INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ANILLOS DE RUBIK

Mayo 1987
450 Ptas.
(IVA incluido)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 128
Mayo 1987

INVESTIGACION Y CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

12 **DISLEXIA, Frank R. Vellutino**
No se encuentra su causa en una percepción visual deficiente, como se ha venido sosteniendo.

22 **ESTRUCTURA DE LOS POLIOVIRUS, James M. Hogle, Marie Chow y David J. Filman**
Los avances en su comprensión tridimensional arrojan nueva luz sobre la naturaleza vírica.

32 **ENFRIAMIENTO Y CONFINAMIENTO DE ATOMOS, William D. Phillips y Harold J. Metcalf**
La luz láser frena y enfría los átomos, que se confinan luego entre "paredes" magnéticas.

46 **EL NIÑO Y LA OSCILACION DEL SUR, Francisco Chávez**
Perturbaciones del Pacífico tropical influyen en el clima y la organización de ecosistemas.

58 **COMPUTADORAS OPTICONEURONALES, Yaser S. Abu-Mostafa y Demtri Psaltis**
Abordarían la resolución por ordenador de problemas que exigen retener todas las soluciones.

66 **LA ROTURA DE LOS CONTINENTES, Enrico Bonatti**
Estudio del proceso en el mar Rojo, donde ahora mismo está naciendo un nuevo océano.

76 **TERMORREGULACION DE LAS MARIPOSAS NOCTURNAS DE INVIERNO, Bernd Heinrich**
Ciertas mariposas vuelan y se alimentan a temperaturas próximas al punto de congelación.

86 **UN CAMPAMENTO MESOLITICO EN DINAMARCA, T. Douglas Price y Erik Brinch Petersen**
Excavaciones arqueológicas descubren, con nuevas técnicas, una cultura del norte europeo.

3 AUTORES

4 HACE...

42 CIENCIA Y SOCIEDAD

96 JUEGOS MATEMATICOS

102 TALLER Y LABORATORIO

107 LIBROS

112 BIBLIOGRAFIA

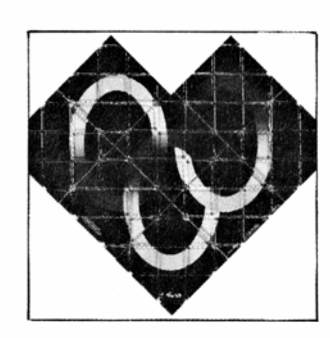
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Ana García García: *Dislexia*; Santiago Torres Martínez: *Estructura de los poliovirus*; Amando García Rodríguez: *Enfriamiento y confinamiento de átomos*; Luis Bou: *Computadoras opticoneuronales* y *Juegos matemáticos*; Montserrat Domingo Morató: *La rotura de los continentes*; Manuel Crespo Veigas: *Termorregulación de las mariposas nocturnas de invierno*; Antonio Blanco Freijeiro: *Un campamento mesolítico en Dinamarca*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Luis Alonso, Miguel de Guzmán, Luis Cornudella y Mariano Artigas



PORTADA

La figura de la portada representa el estado final de los "anillos mágicos", rompecabezas creado por el húngaro Ernö Rubik, inventor también del diabólico cubo que lleva su nombre. El ingenio consta de ocho piezas de plástico, que recuerdan a una tableta de chocolate y que, astutamente engarzadas por hilos de nylon, pueden girar en torno a algunos de los lados. En la sección "Juegos matemáticos", de la que este mes es autor Wolfgang Glebe, se analizan en detalle las nociones matemáticas y los movimientos de los cuadrados que permiten alcanzar ese estado a partir de la configuración inicial. En la resolución del rompecabezas se utilizan ciertos razonamientos de la teoría de grupos. En efecto, el conjunto de las transformaciones que generan las 16 configuraciones rectangulares simétricas que puede adoptar el rompecabezas constituye un grupo que satisface la propiedad asociativa y en el que cada elemento posee un inverso.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.° J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.°, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada de *Investigación y Ciencia*

Página	Fuente
13-14	Frank R. Vellutino
15	Macdonald Critchley y Eileen A. Critchley
16-20	Johnny Johnson
23	Arthur J. Olson, Instituto de Investigación de la Clínica Scripps
24	George V. Kelvin (*arriba*); Tzvy-Wen Jeng, Universidad de Arizona (*abajo*)
25	George V. Kelvin (*arriba*); James M. Hogle, Marie Chow y David J. Filman, Instituto de Investigación de la Clínica Scripps (*abajo*)
26	David J. Filman
27-28	George V. Kelvin
30	David J. Filman
33	William D. Phillips
34-37	Hank Iken
38-39	William D. Phillips
47-48	Otis Brown, H. M. Carle y S. Emerson, Universidad de Miami
49-54	F. Chávez, Miquel Zabala y Jordi Corbera
59	Eung G. Paek y Ken Hsu, Instituto de Tecnología de California (*arriba*); George Retseck (*abajo*)
60	George Retseck
61	John Hong, Instituto de Tecnología de California
62	Thirumalai Venkatesan, Bell Communication Research, Inc. (*izquierda*); George Retseck (*derecha*)
63	George Retseck
65	Eung G. Paek
67	Enrico Bonatti, Observatorio Geológico Lamont-Doherty
68-70	Andrew Christie
71	Andrew Christie (*izquierda*); Enrico Bonatti (*arriba derecha, abajo derecha*); David Walker, Observ. Geol. Lamont-Doherty (*centro derecha*)
72	Andrew Christie
74	John A. Whitehead, Jr., Institución Oceanográfica Woods Hole
77	Enid Kotschnig
78	Bernd Heinrich (*arriba*), Bernd Heinrich y George R. Silver (*abajo*)
79	Patricia J. Wynne
80	Bernd Heinrich
81-84	Patricia J. Wynne
86	Lennart Larsen
88-89	Tom Prentiss
90	T. Douglas Price
91	T. Douglas Price (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
92-93	Tom Prentiss
94	T. Douglas Price
97	*Spektrum der Wissenschaft*
98-101	Wolfgang Glebe
103-106	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

FRANK R. VELLUTINO ("Dislexia") es profesor de psicología en la Universidad estatal de Nueva York en Albany, cuyo Centro de Estudio e Investigación Infantil dirige. Forma parte del claustro docente de Albany desde 1966; anteriormente había trabajado durante dos años como psicólogo clínico en el Hospital de Veteranos de Brockton, Massachusetts. Se licenció y doctoró (1964) por la Universidad Católica de América. El Instituto Nacional estadounidense de Salud Infantil y Desarrollo Humano ha financiado la labor recogida en este artículo.

JAMES M. HOGLE, MARIE CHOW y DAVID J. FILMAN ("Estructura de los poliovirus") recibieron en 1985 el premio Newcomb Cleveland que otorga la Asociación Americana para el Progreso de las Ciencias. Hogle, miembro del departamento de biología molecular del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps, se interesó por el estudio de los virus en el curso de sus trabajos de doctorado, en la Universidad de Wisconsin en Madison. El título de doctor se lo concedió la Universidad de Harvard en 1978. Se encuentra en Scripps desde 1982. Chow se sumó al equipo de Hogle hace seis años, cuando cursaba el postdoctorado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Doctora por la Universidad de Yale (1981), en la actualidad es miembro del departamento de biología aplicada del MIT. Antes de que la contratara esa institución, Chow trabajó en el Instituto Whitehead de Investigaciones Biomédicas y en Centro de Investigación del Cáncer. Filman, que afirma que su "lengua materna es el Fortran", se unió al grupo de investigación cuando Hogle llegó a la Clínica Scripps. Programa ordenadores desde su primer ciclo de carrera y, desde 1975, se ha venido dedicando a la cristalografía. Filman se doctoró en 1981 por la Universidad de California en San Diego, donde investigó hasta 1983, cuando se trasladó a la Clínica Scripps.

WILLIAM D. PHILLIPS y HAROLD J. METCALF ("Enfriamiento y confinamiento de átomos") iniciaron su colaboración en 1981, cuando el segundo empezó a trabajar de consultor para la Oficina estadounidense de Pesos y Medidas, a la que, desde 1978, pertenecía Phillips, quien se había doctorado en 1976 por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y durante dos años había disfrutado de una beca de investigación postdoctoral Chaim Weizmann. Phillips es miembro de la Sociedad Americana de Física y colabora activamente con el coro de su parroquia. Metcalf se incorporó a la Universidad de Brown para doctorarse en física (1967), permaneciendo en ese centro una año más en calidad de investigador adjunto. En 1968 se trasladó a la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, donde enseña física. Ha dictado cursos en diversos centros fuera de los Estados Unidos y en la actualidad es profesor de la École Normale Supérieure de París.

FRANCISCO CHAVEZ ("El Niño y la Oscilación del Sur") es oceanógrafo. En la actualidad realiza trabajos de investigación en el laboratorio de biología marina de la Universidad norteamericana de Duke, por la que se recibió de doctor con una tesis sobre la variabilidad oceánica y la organización de comunidades fitoplanctónicas en la zona litoral del Perú, su país natal.

YASER S. ABU-MOSTAFA y DEMETRI PSALTIS ("Computadoras opticoneuronales") pertenecen al claustro docente del Instituto de Tecnología de California. Abu-Mostafa, que es profesor de ingeniería eléctrica e informática, cursó el primer ciclo de carrera en la Universidad de El Cairo, licenciándose en ingeniería eléctrica por el Instituto de Tecnología de Georgia en 1981. Enseña en el Instituto de Tecnología de California desde que, en 1983, ese centro le expidió el título de doctor por un trabajo que mereció el premio a la tesis más original de aquel año académico. Psaltis se ha formado en la Universidad de Carnegie-Mellon, por la que es doctor desde 1977. Permaneció en ese centro, primero en calidad de adjunto de investigación y más tarde como profesor. En 1980 se incorporó al departamento de ingeniería eléctrica del Caltech. Ha publicado más de un centenar de artículos relativos al reconocimiento de formas y los dispositivos ópticos.

ENRICO BONATTI ("La rotura de los continentes") afirma que sus años de trabajo de campo le han planteado "un delicioso problema": cómo combinar la contemplación pasiva de la belleza de la tierra con la observación analítica de los procesos que encierra. Bonatti se licenció en 1960 por la Scuola Normale Superiore de Pisa. En 1959 visitó la Universidad de Yale con una beca Fulbright; en 1960 se trasladó a la Institución Scripps de Oceanografía y, cuatro años después, a la Universidad de Miami. Desde 1976 es investigador de plantilla del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, de la Universidad de Columbia.

BERND HEINRICH ("Termorregulación de las mariposas nocturnas de invierno"), profesor de zoología de la Universidad de Vermont, estudia la termorregulación de los insectos desde hace casi 20 años. Tras licenciarse por la Universidad de Maine, se trasladó a la de California en Los Angeles, por la que se doctoró en 1970. Los siguientes 10 años los pasó trabajando en el departamento de entomología de la Universidad de California en Berkeley, volviendo después al este, a Vermont. Heinrich estudia actualmente los hábitos de forraje de los cuervos, pero afirma que no ha cambiado su centro de interés: "Sencillamente utilizo organismos distintos para investigar los mismos problemas".

T. DOUGLAS PRICE y ERIK BRINCH PETERSEN ("Un campamento mesolítico en Dinamarca") han logrado explorar conjuntamente el perfil mesolítico de Escandinavia pese a la distancia que separa sus lugares de residencia. Price es catedrático del departamento de antropología de la Universidad de Wisconsin en Madison, donde enseña desde 1974. Doctor en 1975 por la Universidad de Michigan, ha dirigido campañas arqueológicas en los Países Bajos y Dinamarca. En la actualidad Price estudia muestras óseas en busca de datos sobre la alimentación humana en tiempos prehistóricos. En sus investigaciones, Petersen ha visitado Irán, Groenlandia y el sur de Escandinavia. Es lector del Instituto de Arqueología Prehistórica de la Universidad de Copenhagen, por la que se licenció en 1970. Miembro afiliado del Museo Nacional de Dinamarca, Petersen se ha ocupado también de proyectar un nuevo museo arqueológico en Søllerød.

Hace...

José M.ª López Piñero

...ciento cincuenta años

Benigno Risueño de Amador publicó sus dos principales obras: *Influence de l'anatomie pathologique sur la médecine depuis Morgagni jusqu'a nos jours* y *Mémoire sur le calcul de probabilités appliquée a la médecine.*

Nacido en Cartagena en 1802, Risueño estudió filosofía y teología en el Seminario Diocesano, de Murcia, ordenándose de sacerdote en 1820. Su ferviente adhesión a las ideas liberales le obligó a exiliarse en 1823. Tras secularizarse, estudió medicina en la Universidad de Montpellier. Recién graduado alcanzó en 1829 notoriedad como uno de los ganadores de un concurso convocado por la Academia de Medicina, de París. El premio consistía en la gran biblioteca de casi quince mil volúmenes que había legado Jacques Louis Moreau de la Sarthe y el tema propuesto, el interés práctico de las investigaciones sobre el condicionamiento ambiental de las enfermedades endémicas y epidémicas. El estudio de Risueño, que fue publicado en Montpellier con el título de *Quels avantages la Médecine-Practique a-t-elle retirés de l'Étude des Constitutions médicales et des Epidemies?*, se ajusta plenamente a la tradición del ambientalismo hipocrático, tal como era entendida por la medicina francesa de la época.

Durante la siguiente década, Risueño fue nombrado profesor de patología y terapéutica generales en Montpellier, pero su actividad científica continuó ligada preferentemente a la Academia de Medicina, de París. En 1836, la Academia le concedió el premio Portal por el trabajo acerca de la influencia de la anatomía patológica sobre la medicina antes citado, que apareció al año siguiente en las *Mémoires* de la institución. Fue una de las más tempranas revisiones de conjunto dedicadas al tema y contribuyó notablemente a precisar los fundamentos de la mentalidad anatomoclínica. El mismo 1837, la Academia le encargó una memoria acerca del cálculo de probabilidades aplicado a la medicina, con motivo de la polémica entre los partidarios y los detractores de "la méthode numérique" de Pierre Alexandre Louis. El médico cartagenero se inclinó abiertamente por los segundos, afirmando la "perturbadora influencia" de dicho método, tanto en patología como en terapéutica. Defendió la necesidad de la individualización en medicina y aseguró que el número de casos no interesa en nosología, argumentando desde una concepción del razonamiento inductivo de tipo esencialista.

Ofrecemos a continuación la traducción castellana de un fragmento del trabajo de Risueño sobre la influencia de la anatomía patológica en el que analiza las aportaciones de Bichat:

"La originalidad de los puntos de vista generales de Bichat le coloca, sin duda, a la cabeza de la escuela de París, que abre el presente siglo. Dotado de un fondo inagotable de ideas, reúne la profundidad de Bordeu, la sagacidad experimental de Haller y el espíritu de observación de Morgagni. Representó, por sí solo, estos tres hombres. Es, pues, en la época de Bichat cuando la influencia de la observación anatómica sobre la medicina se hace completa. De Morgagni a Bichat esta influencia es débil, ya que se ejerce siempre bajo el mismo enfoque, el de la semiología. Su influencia real data, pues, de Bichat, ya que es necesario distinguir entre el período de formación de una ciencia y el de su aplicación. Una ciencia puede haber sido cultivada durante mucho tiempo y, sin embargo, no haber producido todavía ningún resultado superior al de los otros conocimientos. La influencia de la astronomía en la navegación no fue inmediata, ni tampoco la de la química en las artes suntuarias, industriales o en la misma medicina. Lo mismo ha pasado con la anatomía patológica. De Morgagni a Bichat, esta ciencia no cambió, en absoluto, de dirección, siguió por los mismos caminos; proseguían los trabajos, se acumulaban los hechos, aumentaba el ardor por las investigaciones necrópsicas; pero siempre se iba por el mismo sendero: el estudio de la relación entre alteraciones y síntomas.

"Con Bichat, esta dirección cambia. Sin duda, Morgagni había casi hecho de la anatomía patológica una ciencia. Había construido este edificio sin un plan general y casi pieza a pieza, sin pronunciar siquiera el nombre de la ciencia a la cual levantaba un monumento tan perdurable. Treinta años después, fue un francés, Bichat, quien encontró lo que el genio de todos los anteriores médicos anatomistas no había aún hallado. Fue Bichat quien enseñó, a toda Europa, los principios y las leyes de los hechos; y las miradas, deslumbradas, se fijaron sobre el autor de la *Anatomía general*, que cumplió tan bien la profecía de Sandifort.

"Una sola idea fue el germen y la base de esta obra admirable. Bichat observó que cada lesión orgánica, siempre que afecte a los tejidos análogos, ofrece unas características y produce unos resultados semejantes, sea cual sea el lugar donde se encuentra el tejido afectado. Su consecuencia inmediata fue la doble noción de la anatomía patológica, filosóficamente considerada, y de la anatomía general. Así, dos ciencias nacieron de una sola idea. La analogía de los tejidos se convirtió en la clave de la analogía de las enfermedades, de la misma manera que la analogía de las alteraciones descubrió la de los órganos afectados. La anatomía patológica se convirtió en una luz para la misma anatomía normal y para todas las ramas de la ciencia médica.

"Es el período a la vez orgánico y filosófico de la anatomía patológica. Orgánico, pues hasta entonces no había sido estudiada más que como una rama de la sintomatología, mientras que hoy en día se ha constituido como una ciencia independiente. Filosófico, pues es necesario decir (y esta es una consideración en la que no han caído muchos espíritus distinguidos) que la anatomía patológica, considerada como una rama de la patología, no es más que una ciencia accesoria en la medicina. Hay, sin embargo, un punto de vista más elevado que, dejando aparte su utilidad inmediata, la coloca con la anatomía comparada a la cabeza de la ciencia de la vida. Y he aquí por qué, si en el curso de este escrito decimos a

menudo que no es más que una sintomatología interior, debemos repetir también a menudo que constituye una bella y gran ciencia: doble aserción cuya aparente contradicción desaparece por sus principios.

"Bichat reunió, por otro lado, los tres métodos de investigación. En su *Anatomía general* se encuentran, aliadas para la búsqueda de una sola verdad, la experimentación en animales, la observación clínica y la anatomopatológica, iluminadas por los más elevados puntos de vista fisiológicos de las fuerzas y propiedades vitales...

"La anatomía patológica, en las manos de Bichat y de sus inmediatos continuadores, Bayle, Dupuytren y Laennec, toma una nueva dirección, se abre a caminos hasta entonces desconocidos e ilumina toda la medicina. Esta época es bella y grande por sí misma, por las novedades de los caminos, por el descubrimiento de verdades importantes y por la fecundidad de sus consecuencias. Hay, además, tanta abundancia de trabajos anatomopatológicos, como penuria de los mismos había en épocas anteriores.

"Desde entonces, la ciencia muestra otra faz y comienza a remover nuevos problemas. No había estudiado anteriormente las alteraciones orgánicas más que como causas de muerte: es la época de Bonet; y más tarde, como causas o esencias de la enfermedad: es la época de Morgagni. Con Bichat son estudiadas para aclarar y explicar la vida misma.

"La vitalidad de los tejidos accidentales, la de los tejidos en sus varias transformaciones hacen conocer mejor la naturaleza de la fuerza que produce todas estas metamorfosis. Bichat marca, en anatomía patológica, la separación de dos épocas bien distintas. En la primera se avanza casi al azar, y, sin embargo, algunas verdades son descubiertas, a pesar de que la anatomía patológica produce todavía más extrañeza que interés; más tarde, los métodos severos de investigación filosófica reemplazan los excesos de la imaginación. La multiplicación de los hechos disminuye su carácter de maravillosos y aumenta la necesidad de explicaciones científicas. Comienzan las teorías; se constituye la patogenia, se describen las leyes del origen y desarrollo de las producciones orgánicas, se descubren los tejidos creados o de nueva formación, y se estudia la vida propia y especial que los anima, sus nuevas funciones y su acción secundaria sobre las funciones normales del organismo.

"En la época de Bichat se intentará por primera vez estudiar las leyes generales de la formación de las alteraciones orgánicas, y clasificarlas según sus analogías reales. Hasta entonces, el método de la anatomía vulgar y exterior había servido únicamente como método de clasificación. Laennec, Bayle y Dupuytren han demostrado las reglas constantes que presiden el desarrollo de las alteraciones orgánicas y les han quitado la apariencia de aberraciones de la naturaleza. Son ellos los que han demostrado que no hay menos regularidad en las fases de estas alteraciones que en la formación de cuerpos y tejidos naturales; que estas alteraciones son a menudo creaciones de material orgánico, o, incluso, de órganos nuevos, con vida propia, y no siem-

INFLUENCE

DE

L'ANATOMIE PATHOLOGIQUE

SUR LA MÉDECINE

DEPUIS MORGAGNI JUSQU'A NOS JOURS,

PAR RISUEÑO D'AMADOR,

Professeur à la Faculté de médecine de Montpellier,

Membre correspondant de l'Académie royale de Médecine, chevalier de l'ordre d'Isabelle-la-Catholique d'Espagne, etc.

OUVRAGE COURONNÉ EN 1836

Par l'Académie royale de Médecine dans le concours pour le PRIX *fondé par M. le baron* PORTAL.

« L'anatomie pathologique n'est qu'un des » nombreux points de vue sous lesquels peut » être envisagée la science de l'homme ma- » lade. »

ANDRAL, *Anat. path.*, avant-propos, p. IX.

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE PREMIER.

Etude des termes de la question.

Art. I.

Une question donnée, n'est qu'une conclusion dont il s'agit de rétablir les prémisses : la question est le dernier terme auquel il faut arriver, en reconstituant les termes primitifs ; c'est, en un

VI. Rr.

1. Página inicial del trabajo de Risueño de Amador acerca de la influencia de la anatomía patológica, publicado en 1837 en las Mémoires *de la Academia de Medicina, de París*

MÉMOIRE

SUR LE

CALCUL DES PROBABILITÉS

APPLIQUÉ A LA MÉDECINE,

Lu à l'Académie royale de Médécine dans sa séance du 25 avril 1837,

PAR RISUEÑO D'AMADOR,

Professeur de pathologie et de thérapeutique générales à la Faculté de médecine de Montpellier, membre correspondant de l'Académie royale de Médecine, des Académies de Cadix, Murcie; des Sociétés royales de Bruxelles, Marseille; chevalier de l'ordre d'Isabelle-la-Catholique d'Espagne.



A PARIS,

CHEZ J.-B. BAILLIÈRE,

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE ROYALE DE MÉDECINE,

RUE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, 13 *bis*;

A LONDRES, MÊME MAISON, 219, REGENT-STREET;

A MONTPELLIER, CHEZ L. CASTEL ET CHEZ SEVALLE.

1837.

2. Portada de la memoria en la que Risueño de Amador criticó la aplicación del cálculo de probabilidades a la medicina

pre, alteraciones o degeneraciones de tejidos primitivos; que estos tejidos se nutren, crecen y se desarrollan bajo formas y períodos determinados, etc. Pero, como no se podrá deducir las leyes de la anatomía enferma más que a través de una observación paciente de todos los casos posibles, se han limitado hasta ahora a comprobarlos sucesivamente y no se ha llegado más que a generalizaciones provisionales. De aquí provienen, como en todas las cosas humanas, algunos descarríos, algunos pasos mal dados, algunos juicios precipitados. Ni el propio Bichat se libra de esto, pero, al fin, se conoce la meta y se pone en marcha el movimiento. La escuela de París lo mantiene, y conserva la dirección, con la certidumbre de llegar y alcanzar el objetivo final.

"¡Gloria inmortal al genio que fue el primer motor y al libro que transmitió su acción!"

Dislexia

Aunque la escritura en espejo y otros problemas similares se atribuyen frecuentemente a defectos en la percepción visual, lo cierto es que la dislexia constituye una deficiencia lingüística compleja

Frank R. Vellutino

Con el término dislexia se designa la grave dificultad para aprender a identificar la palabra escrita que padecen ciertos niños, por lo demás normales, cuyo origen podría radicar en deficiencias constitucionales. Se cree, por lo común, que la causa de la dislexia descansa en el sistema visual espacial; la escritura en espejo y la inversión de las letras delatan, viene a decirse, su presencia. Se supone, asimismo, que los disléxicos se muestran vacilantes en el uso preferente de una u otra mano. También se afirma que los niños cuyo primer lenguaje se basa en el alfabeto, y no en los caracteres pictográficos o ideográficos, manifiestan una tendencia mayor a padecer la alteración. Por último, existe la opinión generalizada de que la dislexia se puede corregir mediante la aplicación de terapias encaminadas a "fortalecer" el sistema visual espacial. Se trata de una gavilla de afirmaciones que, lo demuestra la investigación contemporánea, carecen de respaldo.

En 1925, Samuel Torrey Orton, neuropsiquiatra estadounidense, abogaba ya por la relación entre la dislexia y el sistema visual. Orton proponía que la causa de la perturbación estribaba en una disfunción aparente en la percepción y en la memoria visual, caracterizada por una tendencia a ver, invertidas, las letras y las palabras (la *b* por la *d* o *es* por *se*). Tal alteración explicaría, asimismo, la escritura en espejo. Postulaba, además, que la causa de la disfunción yacía en un retraso en la maduración: la consecuencia del fallo en alguno de los hemisferios cerebrales para dominar el desarrollo del lenguaje. Esta última proposición es todavía una hipótesis viable.

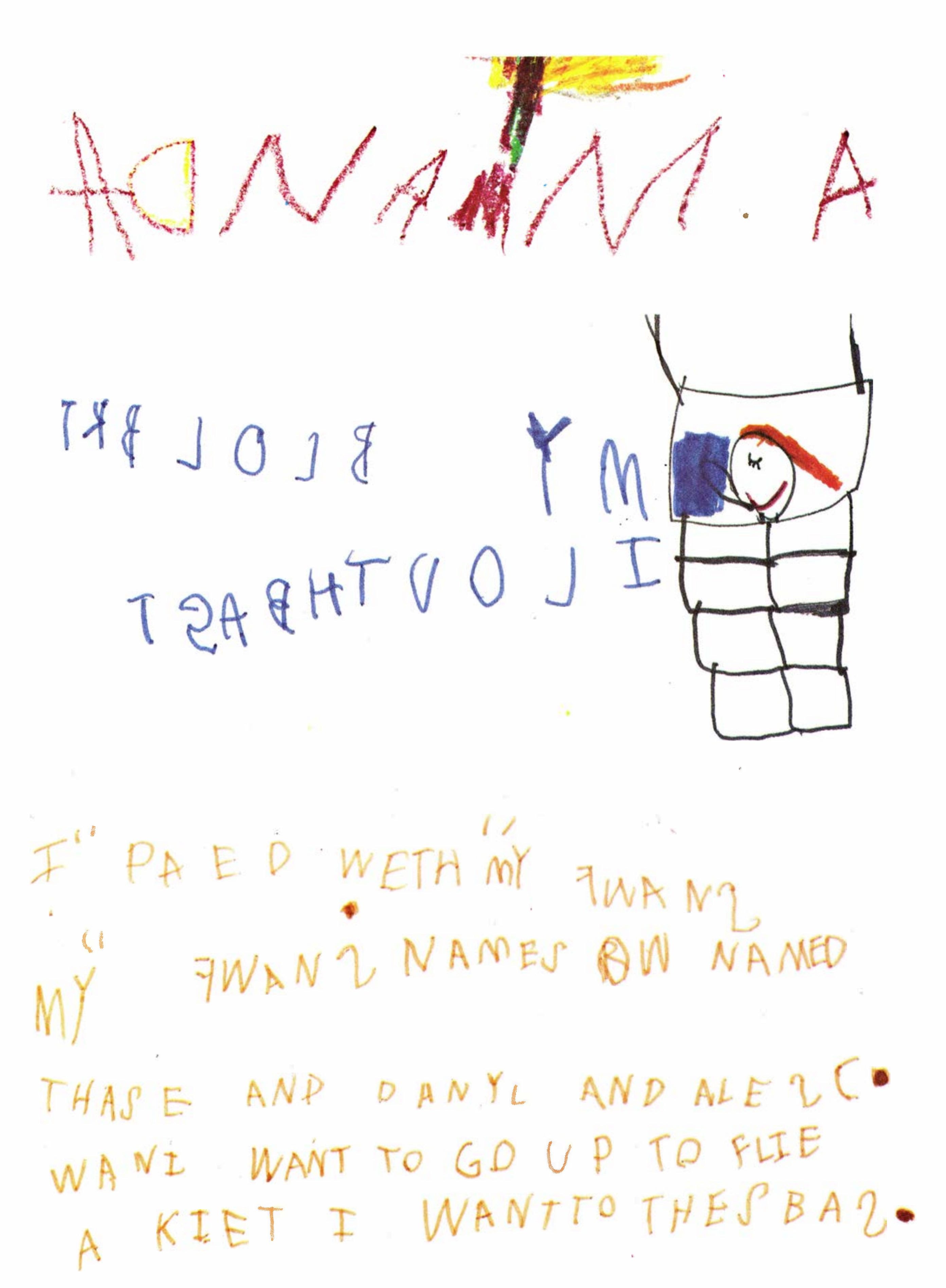
Según otras hipótesis relacionadas, no formuladas por Orton, ciertos defectos motores y visuales o bien alteraciones en la movilidad ocular que afecten a la coordinación binocular, el rastreo ocular y la exploración direccional podrían intervenir en la aparición de la dislexia. La noción de dislexia que la restringe a un problema visual, así como su posible asociación con un dominio cerebral incierto, sirven todavía de base para muchas medidas terapéuticas ordenadas a mitigar la alteración.

Trabajando en el Departamento de Pedagogía y Pediatría de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, el autor y sus colegas comenzaron a estudiar y sopesar las opiniones generalizadas acerca de la dislexia, incluida la idea según la cual ésta residía primariamente en una perturbación visual. Junto con otros científicos de los Estados Unidos y de otros países, hemos descubierto que la dislexia consiste en una perturbación sutil del lenguaje, cuyas raíces brotan en otras áreas: perturbaciones de la codificación fonológica (incapacidad para representar y acceder al sonido de una palabra que ayudaría a reconocerla), segmentación fonémica defectuosa (incapacidad para descomponer una palabra en los sonidos que la forman), pobreza de vocabulario y problemas en la discriminación de las diferencias gramaticales y sintácticas entre palabras y frases. Lejos de constituir un problema visual, todo apunta, en la dislexia, hacia una capacidad limitada en el uso del lenguaje para codificar otros tipos de información.

Para mejor comprender esa descripción de la dislexia, imaginemos la mente convertida en una biblioteca de consulta sumamente refinada. La comparación no es superflua. Estudios recientes parecen indicar que la dislexia guarda una estrecha relación con las remisiones cruzadas y la recuperación de la información ya almacenada en la memoria, así como con la retención y codificación de nuevos datos.

El modelo de la biblioteca se basa en el proceso de almacenamiento de la información en la memoria, que se realiza en distintos niveles. El primero de ellos se presenta en un sistema de almacenamiento sensorial, donde se retiene por breve tiempo una réplica de un estímulo dado. Se cree que el segundo nivel se localiza en una memoria "de trabajo" a corto plazo: un sistema de capacidad limitada en el que una versión codificada (transformada) del estímulo se encuentra disponible durante un período no superior a los treinta segundos. En esta memoria de trabajo la información física se transforma en una representación simbólica más abstracta para su almacenamiento en una memoria a largo plazo, dotada, así se supone, de capacidad ilimitada. Durante el nivel terminal del procesado de la memoria, la forma codificada del estímulo se estabiliza y almacena en la memoria a largo plazo o bien se rechaza o se pierde inadvertidamente desde la memoria de trabajo.

Aplicando este modelo a la investigación, descubrimos que la dislexia es más un síntoma de una disfunción producida durante el almacenamiento y recuperación de la información lingüística que una consecuencia de una perturbación del sistema de visualización. En un experimento solicitábamos, de un grupo de lectores deficientes del segundo al sexto curso de enseñanza primaria que incurrían frecuentemente en errores de inversión, que copiaran dibujos, palabras, letras revueltas y números después de habérselos expuesto durante un breve intervalo de tiempo. Posteriormente, se les pidió que nombraran los estímulos que eran palabras reales. Descubrimos que los lectores con problemas podían reproducir las letras de una palabra estímulo con una orientación y secuencia correctas, pese a que no pudieran nombrar la palabra adecuadamente. Era, por ejemplo, común que copiaran el vocablo *was* correctamente y lo pronunciaran "saw". Cuando se les instaba a que deletrearan en voz alta las palabras justo después

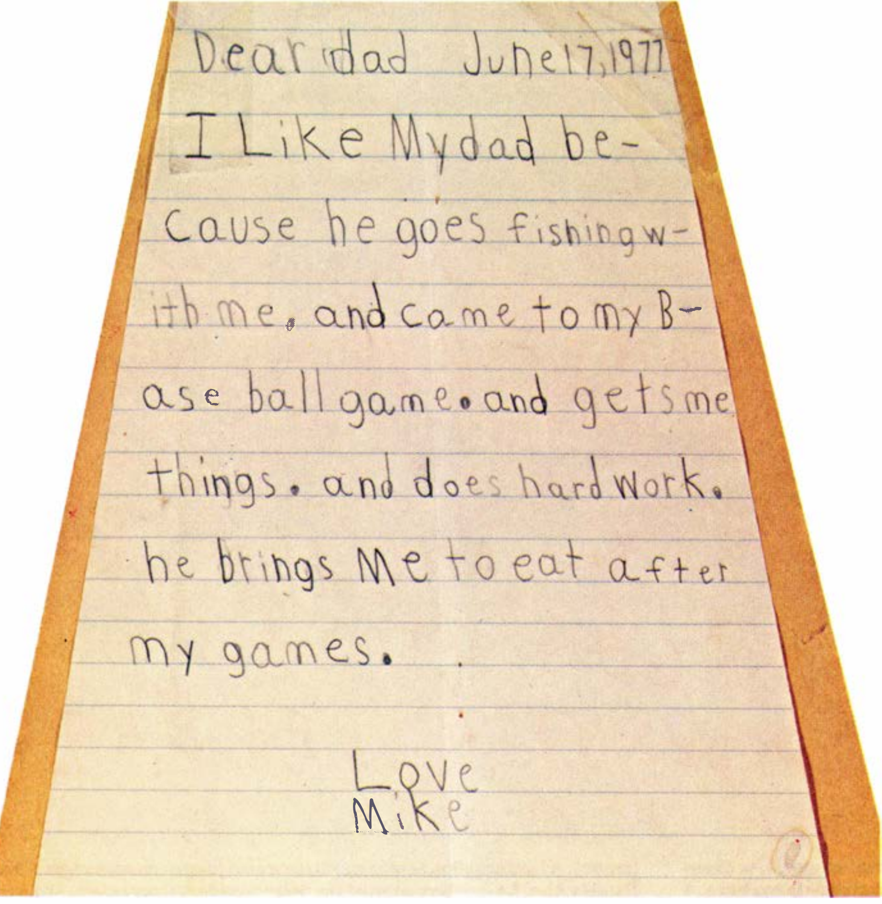


1. **SIGNOS POSIBLES DE DISLEXIA, como la escritura en espejo, se observan con frecuencia en estadios iniciales del desarrollo normal de la escritura. A los tres años, Amanda escribe su nombre en espejo (*arriba*). El hábito persiste cuando quiere escribir, a los cuatro años de edad, "my blanket I love the best" (*centro*). A los cinco años, la niña escribe sobre sus juegos con sus amigos, Tracy, Daniel y Alex. La escritura en espejo ha desaparecido casi por entero; se observa una capacidad evidente para codificar el sonido deseado por medio de letras fonológicamente apropiadas, aunque no siempre sean las correctas (*abajo*).**

de haberlas enunciado enteras, solían deletrear con el orden correcto la mayoría de ellas aun cuando las hubieran enunciado antes incorrectamente.

La conclusión de este experimento era evidente. Pronunciar "saw" por *was* y otros errores parecidos son consecuencia de las dificultades halladas en el almacenamiento y recuperación de los nombres de las palabras escritas, sin que intervenga ninguna perturbación del procesamiento visual espacial.

Tal conclusión se reforzó con los resultados de una serie de estudios sobre la capacidad de los niños para reproducir, a partir de la memoria visual, palabras de un sistema de escritura desconocido. Se les pidió a grupos de lectores disléxicos y normales que escribieran palabras y letras hebreas en la secuencia y orientación exactas, tras habérselas mostrado brevemente. También se probó con algunos niños que estaban aprendiendo a leer y escribir hebreo, para compararlos con los dos primeros grupos.



Dear dad June 17, 1977
I Like Mydad be-
cause he goes fishing w-
ith me, and came to my B-
ase ball game. and gets me
things. and does hard work.
he brings Me to eat after
my games.

Love
Mike

2. DESARROLLO NORMAL evidente en una postal del Día del Padre escrita por un niño de primer curso de primaria (*arriba*) y luego de segundo curso, tras haber recibido instrucción en lectura durante un año.

El principal descubrimiento fue que los lectores disléxicos realizaron su ejercicio tan bien como los normales, aunque, obviamente, ninguno de ambos grupos lo hicieron con la perfección de los niños que estaban aprendiendo hebreo. Manifiestamente, ese resultado destacaba un hecho: cuando se usaban símbolos complejos y semejantes a palabras, sin ningún tipo de asociación lingüística –es decir, sin significado ni sonido eficaz–, el recuerdo visual de esos símbolos no encerraba mayor dificultad para los lectores disléxicos que para los lectores normales. Ello implicaba que las propiedades lingüísticas de las palabras, en particular sus significados y sonidos, condicionaban la memoria de los símbolos visuales que representaban dichos términos.

Los dos grupos de niños que no estaban familiarizados con el hebreo presentaban la misma tendencia a dibujar las letras hebreas de izquierda a derecha: quedaba patente que la capacidad de mantener la direccionalidad izquierda-derecha no se resentía forzosamente en los disléxicos. Dicho de otra manera, si los disléxicos tienen dificultad para mantener la direccionalidad correcta, ello es un síntoma de la alteración en la lectura y no la causa de dicho trastorno.

Una conclusión secundaria de ese estudio (avalada con otros estudios que analizaban directamente el almacenamiento sensorial en lectores disléxicos y normales) es la siguiente: los lectores disléxicos son capaces de mantener un vestigio de memoria durante el mismo tiempo que los lectores normales. Lo que es lo mismo: los vestigios visuales no se disipan antes en la memoria sensorial de un disléxico que en la de un lector normal; la percepción de la forma visual es, al parecer, comparable en ambos grupos.

Si los lectores disléxicos son capaces, al menos, de percibir y reproducir las letras aproximadamente con el mismo grado de precisión que los lectores de desarrollo normal, el problema se centra de nuevo en la lingüística, y no en los sistemas de codificación visual. Las palabras escritas pueden identificarse a través del procesamiento de la palabra completa, que se basa en sus rasgos visuales definitorios, sus significados y el contexto donde se presentan, o pueden identificarse por medio del procesamiento "de la parte en el todo", que se funda en la cartografía alfabética: descomposición de las palabras en sonidos de letras.

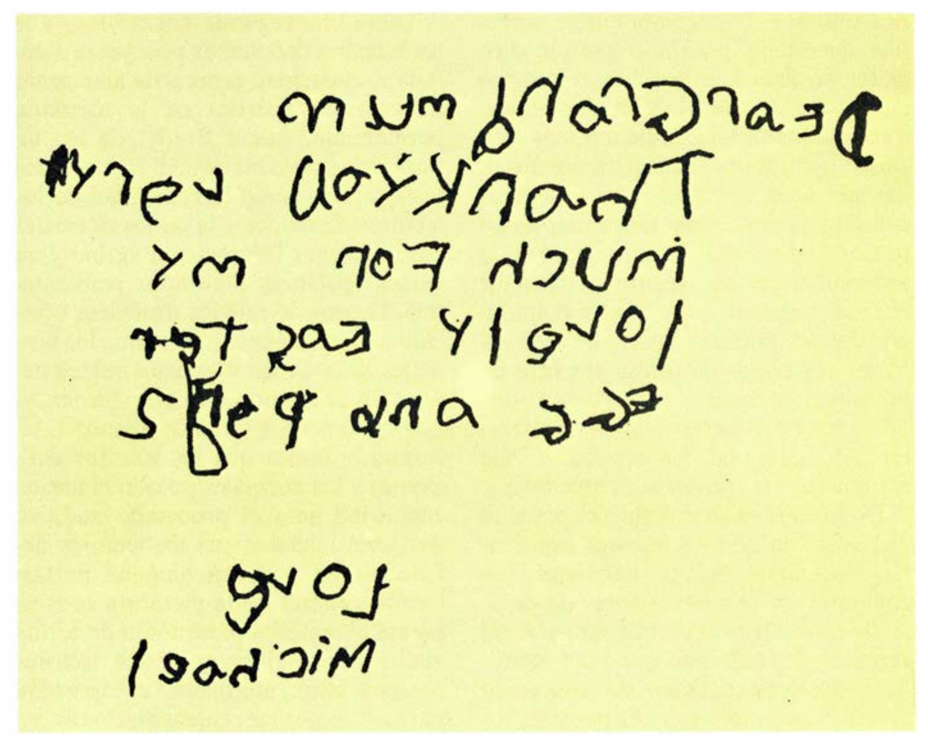
Dado que aprender a leer encierra

una dificultad intrínseca, el lector principiante tiene que estar capacitado para adoptar ambas estrategias en su identificación de las palabras. Si el niño se apoya de manera excesiva en la estrategia de la palabra entera –y no utiliza los sonidos ligados a los caracteres alfabéticos para conseguir decodificar términos nuevos– se impone un esfuerzo excesivo a la memoria visual; se cometen errores del tipo *es/se* y *sabor/sobar*. Por otra parte, los niños que se ejercitan exclusivamente en la cartografía alfabética –y no emplean los rasgos visuales definitorios, los significados de la palabra y el contexto para facilitar su identificación– tienen dificultad para leer fluidamente y para comprender lo que están leyendo.

Resulta, pues, evidente que las causas de la dislexia podrían yacer, por un lado, en razones lingüísticas específicas (tales como pobreza de vocabulario o perturbación de la capacidad de trazar el mapa de los sonidos) que afecten sólo a determinadas subespecialidades, que son componentes necesarios para acometer debidamente la lectura. Por otro lado, resulta plausible la intervención de perturbaciones de lenguaje más generalizadas, que condicionen todas las subespecialidades. Isabelle Y. Liberman y Donald P. Shankweiler, de los laboratorios Haskins, Inc., en New Haven, han propuesto una hipótesis en favor de la primera posibilidad.

Según Liberman y Shankweiler, los lectores con problemas carecen de conciencia explícita de que las palabras habladas y escritas pueden dividirse en fonemas individuales; ello les dificulta su aprendizaje de la identificación de las palabras mediante la cartografía alfabética y la síntesis letra-sonido (la denominada decodificación fonética). Se cree que la segmentación fonética deficiente supone una manifestación de un problema más general en la codificación fonológica, caracterizado por el almacenamiento en la memoria de representaciones empobrecidas de los sonidos de las letras y los nombres de las palabras.

En teoría, una tal perturbación podría acarrear dificultades no sólo para aprender los sonidos asociados con las letras y sus combinaciones, sino también para aprender los nombres de las palabras escritas enteras. Por tanto, las palabras se almacenarían sin códigos fonológicos completos, que se corresponderían a las tarjetas del archivo en el modelo de biblioteca. Al pedirle al niño que nombre la palabra adecuada, éste se encuentra con que no ha retenido las claves necesarias del nombre de la palabra.



3. ESCRITURA EN ESPEJO TIPICA que se observa en una nota redactada por un niño de cinco años y dedicada a su abuela ("Grandmum"). El desarrollo de este niño no fue normal: cuando se le reconoció a los once años era disléxico, según los investigadores ingleses McDonald Critchley y Eileen A. Critchley.

Los resultados de distintos estudios realizados en nuestro laboratorio y en otros apoyan la idea según la cual las deficiencias en el trazado del mapa alfabético y en la decodificación fonética son factores primordiales a la hora de provocar dificultades en la lectura. Tales estudios demuestran sólidamente que los lectores seriamente incapacitados presentan una habilidad muy inferior a la mostrada por los lectores normales, cuando se trata de aprender a utilizar los sonidos de las letras con el fin de decodificar pseudopalabras (conjuntos de letras que semejan palabras sin sentido, utilizadas en las pruebas) y palabras que nunca han visto anteriormente. Tales deficiencias parecen ser el resultado de una menguada retención de los fonemas. Asimismo, se ha descubierto que los niños de jardines de infancia y preescolar que poseen cierta habilidad para segmentar las palabras habladas en sílabas y unidades del tamaño de fonemas aprenden a leer mejor que los niños dotados de escasa habilidad o carentes absolutamente de ella. Quizá la confirmación más impresionante de todo esto provenga de los estudios que demuestran que los niños a los que se ha enseñado a identificar fonemas poseen una mayor capacidad para trazar el mapa alfabético y, en consecuencia, para identificar la palabra escrita.

Si la falta relativa de conocimiento de los fonemas y la torpeza en la decodificación fonética se fundamentan en dificultades básicas de la codificación fonológica, es lógico suponer que los lectores deficientes se encontrarán con problemas para recordar las palabras que oyen. Y esto es justamente lo que sucede. En un considerable número de estudios realizados en nuestro laboratorio, en los Haskins y en otros, los lectores deficientes presentaron más dificultad que los normales cuando se les instó a que repitieran listas de palabras que acababan de escuchar.

En esa línea, algunos investigadores –en especial Martha B. Denckla y Rita G. Rudel, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia– descubrieron que los disléxicos mostraban una mayor lentitud e imprecisión que los lectores normales no solamente deletreando o pronunciando palabras, sino también al nombrar objetos comunes, colores y números. El comportamiento de muchos disléxicos se caracterizaba frecuentemente por un grave bloqueo: circunlocuciones, vacilaciones prolongadas y errores de sustitución (llamaban "perro" a la imagen ofrecida de un gato).

Las limitaciones evidenciadas en el desarrollo del vocabulario y de la capacidad semántica en general parecen ser responsables, también, de dificultades encontradas en la identificación de las palabras. Así lo han sugerido va-

rios estudios. Una competencia sintáctica debilitada podría constituir otro factor posible. Los estudios realizados en nuestro laboratorio y en otros muestran que los disléxicos tienen más dificultad que los normales para comprender las frases, en especial las de sintaxis compleja; para utilizar morfemas de inflexión (tales como *-aba* y *-ando*) en la determinación de tiempo y número; para discriminar entre frases gramaticales y no gramaticales; para utilizar frases complejas de forma correcta en sentido gramatical, y para efectuar distinciones finas entre palabras abstractas, en particular las reputadas "sin contenido" (*si, pero* y *su*, entre otras).

De hecho, existen múltiples pruebas que sugieren que los lectores deficientes presentan menos habilidad (en comparación con los lectores de desarrollo normal) para identificar palabras carentes de contenido que para identificar palabras dotadas de contenido (*perro, gato,* etcétera). Al parecer, los lectores deficientes también encuentran obstáculos si se trata de recurrir al contexto de la frase en busca de ayuda para identificar la palabra escrita. No obstante, debe señalarse que no se ha demostrado todavía una conexión causal entre la discapacidad para la lectura y las limitaciones en el procesamiento de los atributos semánticos y sintácticos de la palabra escrita.

Ante la posibilidad de que determinadas perturbaciones del lenguaje bloqueen las capacidades de los disléxicos, se plantea la cuestión de si tienen o no alterado el mecanismo de procesamiento auditivo. Podría ser que su memoria sensorial auditiva, o ecoica, estuviera menoscabada, lo que significaría que la secuencia auditiva se disiparía antes en los lectores deficientes que en los normales. Randall W. Engle y sus colaboradores, de la Universidad de Carolina del Sur, tras analizar esa posibilidad, la han descartado. Nosotros hemos llegado a resultados similares.

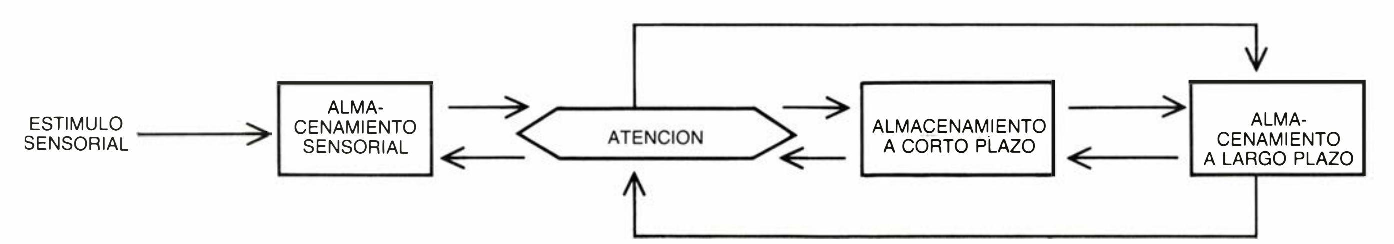
Cabía una segunda posibilidad: que los lectores deficientes poseyeran limitada su capacidad general de almacenar información acústica en la memoria permanente. Susan Brady, de los laboratorios Haskins, examinó esa hipótesis, comparando la capacidad de los lectores disléxicos y la de los normales para recordar información verbal y no verbal (palabras y sonidos ambientales). Descubrió que los disléxicos ofrecían un rendimiento menor que los normales sólo en los ejercicios relacionados con la memoria verbal. En términos de nuestro modelo de memoria, tal resultado indica que los lectores deficientes y los normales poseen la misma capacidad para el procesado auditivo del nivel inicial y que los lectores deficientes no padecen ninguna perturbación general de la memoria concerniente al material presentado de forma auditiva. Sin embargo, estos lectores parecen tener mermada su capacidad para recuperar las representaciones lingüísticas almacenadas en la memoria a largo plazo. Aparentemente, tales resultados son coherentes con las teorías que relacionan la codificación lingüística con la incapacidad para la lectura.

Otras hipótesis postulan que la causa de la dislexia se encuentra en funciones no lingüísticas, pero ninguna de ellas es muy convincente. De acuerdo con la hipótesis del "déficit de atención", la dificultad en la lectura tendría que ver con una incapacidad generalizada para concentrarse y prestar atención. Algunos investigadores han aportado datos que asocian este modelo con alteraciones fisiológicas. Sin embargo, los niños que lo manifiestan presentan dificultades en otras áreas aparte de la lectura y no pueden constituirse en representativos de aquellos otros cuyos problemas se limitan a esta última.

Otra teoría responsabiliza de la dislexia a perturbaciones en la "transferencia modal cruzada", es decir, a una incapacidad para relacionar los estímulos que se perciben a través de un sistema sensorial determinado con los que se perciben a través de otro sistema. Esa teoría carece de apoyo experimental y de coherencia lógica; parece improbable que un niño de inteligencia media o por encima de la media (como es el caso de los disléxicos) presente déficits de transferencia modal cruzada, dado el grado de aprendizaje modal cruzado que se requiere para alcanzar al menos el nivel medio en cualquier prueba de inteligencia.

Es necesario citar algunas teorías más. Así, la que postula deficiencias en el aprendizaje asociativo. Otra arguye que a los disléxicos les cuesta detectar patrones y aprender "relaciones invariables", tales como las reglas que gobiernan el trazado del mapa alfabético o los conceptos numéricos. Una vez más, ambas teorías tropiezan con la improbabilidad de que un individuo que puntúa alto en pruebas de inteligencia sufra perturbaciones tan generalizadas. Nuestro propio trabajo muestra que los lectores deficientes que no obtenían buenas puntuaciones en tales pruebas estaban limitados por su capacidad de codificación lingüística. Cuando las pruebas no requerían codificación lingüística, los lectores con problemas conseguían mejorar sus ejercicios de asociación y aprendizaje de normas.

En uno de esos estudios solicitábamos de un grupo de lectores deficientes y normales que se esforzaran por asociar parejas de símbolos visuales nuevos con palabras de dos sílabas carentes de significado; cada símbolo representaba siempre la misma sílaba sin sentido [*véase la figura 7*]. El niño debía aprender a decir la palabra bisilábica sin sentido cuando se le mostraba la pareja de símbolos que representaban el vocablo en cuestión. Para ayudarle a recordar la palabra entera, se le rogaba que intentase recordar el símbolo aislado que representaba cada sílaba determinada. Tras haber practicado este ejercicio, se reordenaban los símbolos; entonces, se le mostraban al niño las series reordenadas de símbolos



4. MODELO DE PROCESADO DE LA INFORMACION de los niveles de memoria y de sus interrelaciones, mostrado esquemáticamente. En el almacenamiento sensorial se mantiene una copia literal del estímulo visual o auditivo durante un breve período. Si el sujeto presta atención al estímulo, éste entra en un sistema de memoria a corto plazo, donde se codifica con la representación apropiada para su almacenamiento en la memoria a largo plazo; un estímulo al que no se presta atención no se codifica y se pierde de la memoria. Las flechas largas sugieren algunas de las interrelaciones entre los sistemas de memoria. Por ejemplo, es más probable que una persona preste atención a un estímulo familiar porque en la memoria a largo plazo se almacena una representación del mismo.

para comprobar si era capaz de transferir, o generalizar, las unidades símbolo-silábicas que había aprendido antes para asociar las parejas desordenadas. Este procedimiento es similar al de aprender sonidos de letras en *cat, ran* y *fan* y basarse en esos sonidos para decodificar palabras "nuevas" como *fat, rat* y *can*.

A un segundo grupo de lectores deficientes y normales se les encomendó una tarea de aprendizaje y transferencia similar, pero en lugar de aprender asociaciones visuales-verbales aprendían a asociar y transferir parejas visuales; como antes, uno de los símbolos de la pareja de estímulo representaba siempre uno de los símbolos de la pareja de respuesta. Del estudio se sacó una primera observación importante: los lectores deficientes realizaban los ejercicios de aprendizaje visual-verbal peor que los normales. Lo que significaba que encontraban dificultades en la asociación inicial y en el aprendizaje de transferencia porque su incapacidad para recordar las sílabas sin sentido les perjudicaba, pero no porque no pudieran asociar o generalizar. Se descubrió también que los lectores deficientes eran tan capaces como los normales para los ejercicios de asociación visual-visuales y de aprendizaje de transferencias; el hallazgo verificaba nuestra conclusión. Por tanto, los lectores deficientes parecían presentar dificultad con las tareas de asociación y de aprendizaje de reglas exclusivamente cuando tales tareas requerían el almacenamiento y recuperación de representaciones auditivas de palabras y sílabas.

PALABRAS REALES		
TRES LETRAS **was**	CUATRO LETRAS **loin**	CINCO LETRAS **blunt**
LETRAS REVUELTAS		
TRES LETRAS **dnv**	CUATRO LETRAS **jpyc**	CINCO LETRAS **ztbrc**
NUMEROS		
TRES DIGITOS **382**	CUATRO DIGITOS **4328**	CINCO DIGITOS **96842**

5. ESTIMULOS VERBALES Y NO VERBALES ofrecidos durante medio segundo a lectores deficientes y normales de segundo y sexto curso. En una primera fase del experimento, se instaba a los niños para que escribieran de memoria palabras, letras revueltas o números; en una segunda fase, tenían que nombrar cada carácter de un estímulo en el orden correcto, en el caso de las palabras tras haberlas pronunciado. Los lectores deficientes realizaron tan bien como los normales la fase de copiar, pero no la de nombrar; parece, pues, que los problemas de los primeros radican en la perturbación del procesamiento verbal y no del visual.

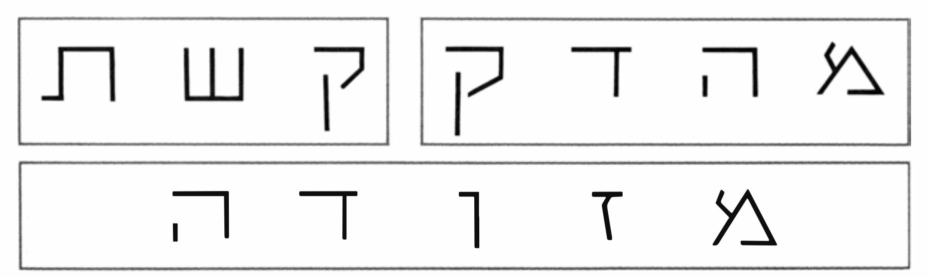
Llegamos, por fin, a lo que podría llamarse teoría del déficit en serie. Supone en la dislexia una incapacidad para recordar la secuencia de una serie de datos o sucesos. Admite que el cerebro posee una capacidad de ordenamiento ubicuo, una premisa, en mi opinión, muy poco probable. Por el contrario, pienso que los distintos sistemas cognoscitivos poseen sus propias normas y algoritmos para establecer el orden y la secuencia. De andar yo en lo cierto, se descartarían las teorías de este tenor.

Algunos investigadores han propuesto una aproximación algo diferente de las que se han analizado hasta aquí. Sugieren que la incapacidad para la lectura puede asociarse con cierto número de alteraciones neurológicas, cada una de ellas responsable de uno u otro de los procesos básicos que se involucran en el aprendizaje de la lectura. Tal perspectiva implica la existencia de una serie de patologías neurológicas caracterizadas, respectivamente, por perturbaciones visuales, dificultades en el lenguaje, deficiencias en la transferencia modal cruzada y así sucesivamente. Aunque la incapacidad para la lectura puede ser consecuencia de varios factores diferentes, la posible causa en un niño que es normal en cualquier otro aspecto debe ser más circunscrita. Como ya he argumentado, el problema se encuentra en el dominio lingüístico. Sin embargo, la cuestión continúa sin resolverse.

Nuestro trabajo y el de otros científicos ha aportado otras aproximaciones diferentes al problema de la dislexia. En primer lugar, importa señalar que no existen conductas de lectura bien definidas que permitan distinguir entre un disléxico y otros lectores deficientes cuyas dificultades estriben, pongamos por ejemplo, en una falta de experiencia; tampoco se dispone de patrones clínicos discriminantes. Todos los lectores deficientes presentan dificultad para aprender a identificar y deletrear las palabras escritas, pero no todos han de calificarse como disléxicos, si por dislexia se entiende una incapacidad para la lectura muy específica en un niño que, en todo lo demás, es normal. Además, los errores de inversión, que se consideran característicos de esa perturbación, no suponen más que el 20 o 25 por ciento del total de los errores de lectura, la mayoría de los cuales son generalizaciones secundarias a un conocimiento imperfecto de las asociaciones lingüísticas (tales como *dan* por *pan* o *bombero* por *bombardero*).

Por otra parte, los errores de inversión admiten una explicación plausible sin necesidad de recurrir a la confusión espacial. Por ejemplo, si un niño intenta recordar las palabras *aso* y *osa* sólo como entidades completas y no conoce el sonido de las letras, existe una gran probabilidad de que las invierta. Lo hemos verificado en experimentos en los que dos grupos de disléxicos y lectores normales (de segundo y sexto curso de enseñanza primaria) aprendían a identificar pseudopalabras, formadas con un alfabeto nuevo, que se creaban para favorecer la aparición de errores de inversión del tipo *osa/aso*. Los niños a los que se había enseñado a identificar esas pseudopalabras mediante un método de palabras enteras cometieron muchos más errores de inversión que aquellos otros a los que se había enseñado a utilizar el trazado del mapa alfabético; ahora bien, los lectores deficientes no cometieron más errores de inversión que los normales. Parece evidente que la interpretación de los errores de inversión basada en la confusión espacial es incorrecta.

Tampoco se conoce cuál sea el significado clínico de la escritura en espejo. Se puede observar cierto grado de escritura en espejo tanto en los lectores desarrollados normalmente como en los deficientes. Muy probablemente, esa tendencia resulta ser un vestigio de un estado de desarrollo más temprano que algunos lectores deficientes tardan más en superar. En mi opinión, dicho estado persiste en esos niños porque presentan dificultades para recordar las claves visuales lingüísticas y las que proporciona el contexto de la frase, que facilita el conocimiento correcto de las posiciones relativas de las palabras y las letras, así como la dirección que siguen. La causa del hábito de escritura en espejo reside en la falta de una práctica adecuada en



6. PALABRAS HEBREAS mayúsculas simplificadas presentadas simultáneamente a tres grupos (de segundo a sexto curso de enseñanza primaria): lectores deficientes y normales no familiarizados con el hebreo y niños que lo estaban estudiando. Se mostraban palabras de tres, cuatro y cinco letras (de las que aquí se ofrece un ejemplo) durante tres, cuatro y cinco segundos, respectivamente. Los alumnos debían reproducir de memoria las palabras en el papel. Entre los no familiarizados con el hebreo, los lectores deficientes lo hicieron con idéntica corrección que los normales. (No tan bien, por supuesto, como los alumnos de hebreo.)

escritura y ortografía, lo que, de hecho, es consecuencia de los problemas del niño con la lectura. En otras palabras: la escritura en espejo de lectores deficientes resulta de sus dificultades con la lectura, y no de la confusión espacial.

Otro concepto erróneo bastante extendido es el que atribuye los problemas de lectura a una precariedad perceptiva asociada con defectos motores y oculomotores o con defectos oculares distintos de la pérdida de agudeza visual. Si las deficiencias en el desarrollo motor y oculomotor o los defectos en los movimientos del ojo menoscabaran la percepción y crearan problemas de lectura, no se podría explicar por qué un número elevado de niños con parálisis cerebral y lesiones en el tracto visual aprenden a leer y escribir.

Existe, además, la idea equivocada de que la dislexia halla mejor asiento en los países donde los sistemas de escritura se basan en un alfabeto que allí donde tales sistemas son pictográficos o de menor complejidad fonética. Harold W. Stevenson y sus colegas de la Universidad de Michigan realizaron un estudio que ha aportado algunos datos que contradicen ese prejuicio. Observaron niños en edad escolar de ciudades semejantes de Estados Unidos, Japón y Taiwan. Los tres grupos se comparaban mediante múltiples pruebas que valoraban el rendimiento escolar, así como la aptitud cognoscitiva y para el lenguaje. Los resultados no mostraron indicio alguno de que los sistemas de escritura de Japón y China favorezcan la exención de incapacidad para la lectura. El hecho de que las lenguas japonesa y china contengan, respectivamente, caracteres que representan sílabas y palabras enteras no parece suponer ninguna diferencia a ese respecto.

Puesto que la dislexia se asocia en general con disfunciones cerebrales y con la capacidad del cerebro para almacenar y recuperar información, es necesario considerar la posibilidad de que existan factores constitucionales –genéticos o neurológicos– que contribuyan a la aparición de la alteración. La verdad es que no disponemos de criterios diagnósticos que permitan diferenciar claramente entre el origen constitucional o el secundario a la experiencia de la incapacidad para la lectura. Sin embargo, existe una prueba altamente significativa: el número de niños con problemas de lectura supera el de las niñas, en proporciones que oscilan entre 4:1 y 10:1.

Tales proporciones podrían tomarse como base para ambas teorías de la dislexia, la constitucional y la del déficit del lenguaje, si consideramos también los resultados de algunos estudios del desarrollo que demuestran que los niños están menos capacitados, en general, que las niñas para el lenguaje y las tareas relacionadas con el mismo. Los niños pueden presentar, congénitamente, menos aptitudes que las niñas para el lenguaje o bien ser más vulnerables que ellas a los defectos neurológicos que afectan el desarrollo del lenguaje. En consecuencia, si es cierto que la incapacidad para la lectura obedece a limitaciones en la capacidad para el lenguaje, los déficits de lenguaje constitucionales serán más frecuentes en los niños que en las niñas.

La apoyatura en favor de una base genética para el origen de la dislexia procede de un pequeño número de estudios familiares y con gemelos llevados a cabo durante años. Los primeros trabajos recogidos en la bibliografía carecían de un control suficiente, pero mostraban de una manera regular que la incapacidad para la lectura se daba, con mayor frecuencia, entre familiares cercanos que en la población general, más frecuentemente también entre gemelos que en hermanos y presentaba una proporción de concordancia mucho más elevada entre gemelos monocigotos (idénticos) que en los dicigotos. Recientemente, John C. DeFries y sus colaboradores, del Instituto de Genética del Comportamiento de la Universidad de Colorado en Boulder, han verificado esos hallazgos en un estudio realizado con unos controles mucho más rigurosos.

En la investigación llevada a cabo por el grupo de Boulder con Shelly D. Smith, se descubrió un dato sorprendente: la localización experimental de cierto gen del cromosoma 15 en miembros de familias con historia de incapacidad para la lectura. Cuando se localiza un gen que puede ser responsable de un carácter dado en un cromosoma determinado, los genetistas tienen la posibilidad de descubrir el mecanismo a través del cual dicho gen origina el carácter. Ese hallazgo podría suponer un cambio significativo en el estudio de la dislexia, pero todavía no ha podido replicarse.

Por otra parte, cierto número de investigadores de la función cerebral han comenzado a estudiar la etiología de la dislexia, y sus primeras observaciones resultan prometedoras. Un equipo de Boulder encabezado por David W. Shucard comparó lectores disléxicos con normales mediante medidas que valoraban las respuestas electrofisiológicas a los estímulos auditivos y visuales. El principal hallazgo del grupo fue el de que la actividad eléctrica en respuesta a la lectura se caracterizaba, en los disléxicos, por ser de amplitud mayor en el hemisferio izquierdo que en el derecho, mientras que en los lectores normales sucedía lo contrario.

Una técnica nueva, de reciente aplicación en ese área, es la denominada "cartografía de la actividad eléctrica cerebral" (BEAM), desarrollada por Frank H. Duffy y sus colaboradores en el Hospital Infantil de Boston. Con la técnica BEAM se obtienen mapas topográficos de las funciones del cerebro, no de sus estructuras. Duffy y sus asociados han recabado ya pruebas de que el funcionamiento del hemisferio izquierdo en los disléxicos difiere, cualitativamente, del característico de los lectores normales. En concreto, las diferencias se destacan en las regiones adyacentes de los lóbulos parietal y temporal izquierdos, que, según se sabe, son las áreas del cerebro que controlan el habla, el lenguaje y las actividades lingüísticas afines.

No puedo pasar por alto los estudios neuroanatómicos realizados por Albert M. Galaburda y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de Harvard. Mediante el análisis posmortem del cerebro de varones disléxicos, se revela-

ron dos tipos de anomalías anatómicas en estos sujetos. En primer lugar, faltaba persistentemente el patrón habitual de asimetría cerebral en las regiones del lenguaje: atípicamente, las regiones del hemisferio izquierdo no estaban mucho más desarrolladas que las del hemisferio derecho. En segundo lugar, en la corteza cerebral de las áreas relacionadas con el lenguaje existían múltiples zonas donde la disposición microarquitectónica y la localización de las neuronas, o células nerviosas, estaban alteradas, especialmente en el hemisferio izquierdo.

Dado que la ausencia de asimetría resulta del desarrollo excesivo de ciertas áreas del hemisferio derecho, normalmente pequeñas, Galaburda supuso que tanto la anomalía anatómica como la alteración de la arquitectura neuronal podrían estar reflejando un bloqueo contra el proceso de desarrollo normal en el que se eliminan las neuronas desechables y sus conexiones. Cabe presumir que la extraña organización microanatómica de las áreas del lenguaje del cerebro explicará algunas de las perturbaciones lingüísticas que se observan en las alteraciones de la lectura.

A Norman Geschwind se debe la hipótesis según la cual las variaciones del patrón habitual de lateralización cerebral, observadas por Galaburda, se relacionaban de manera significativa con las alteraciones que implican una disfunción del sistema inmune. Sugirió que los mecanismos comunes de desarrollo, actuando durante la vida fetal, producirían un desarrollo anómalo de parte del sistema inmune, así como el desarrollo asimétrico anormal en el cerebro; igualmente, proponía que la testosterona, hormona sexual masculina, intervendría de manera importante en estos mecanismos. Aunque se postulaba que la testosterona entorpecía el desarrollo normal de las áreas del lenguaje, Geschwind sugería también que podía producir un desarrollo superior de ciertas áreas del cerebro implicadas en la visualización espacial y en la coordinación oculomotora. Si se verifica esa sugerencia, el fracaso de los investigadores en obtener pruebas para las teorías de déficit visual de la dislexia quedaría explicado, al menos parcialmente.

Las teorías no lingüísticas de la dislexia que hemos venido examinando han creado sus propias técnicas terapéuticas encaminadas a corregir las perturbaciones cognoscitivas implicadas en ellas. Por ejemplo, las teorías de precariedad visual han proporcionado aproximaciones curativas ideadas para mejorar la percepción visual, tales como el entrenamiento optométrico que facilitara la coordinación binocular, el rastreo ocular, etcétera. De ma-

SERIES DE ADIESTRAMIENTO

Estímulo visual	Respuesta verbal
	HEGPID
	ZONJEC
	TIVZED
	VADCIB

SERIES DE ADIESTRAMIENTO

Pareja visual	Cuadro de respuestas

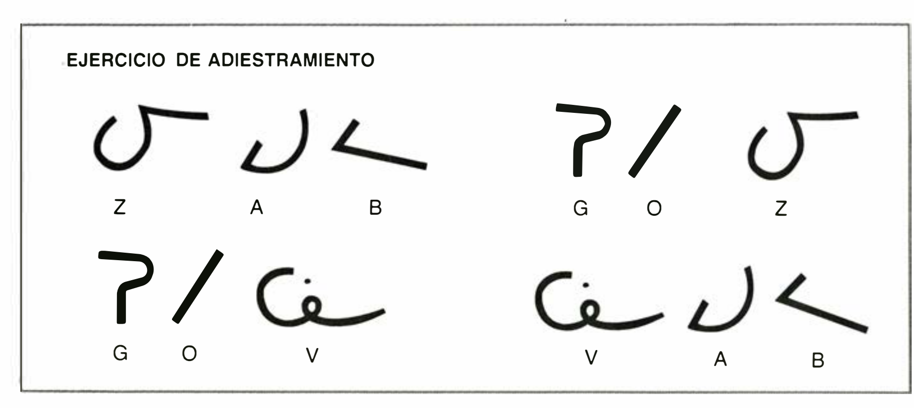
SERIES DE TRANSFERENCIA

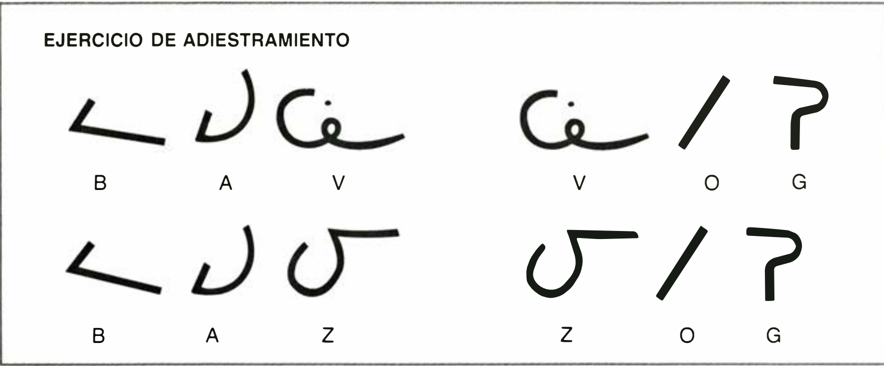
Estímulo visual	Respuesta verbal
	CIBJEC
	ZONVAD
	PIDTIV
	ZEDHEG

SERIES DE TRANSFERENCIA

Pareja visual	Cuadro de respuestas

7. EJERCICIOS PARA APRENDER REGLAS dadas a lectores deficientes y normales de cuarto, quinto y sexto curso de enseñanza primaria. En el ejercicio visual-verbal (*izquierda*) se utilizaban símbolos visuales nuevos; cada uno representaba una sílaba determinada. Se adiestraba a los niños (*arriba*) para que asociaran cada pareja de símbolos (estímulos) con la respuesta correcta, una palabra de dos sílabas sin sentido. Posteriormente, se les mostraba una serie transferida (*abajo*) en la que los símbolos y las palabras estaban ordenados de manera distinta y se solicitaba de ellos que dijeran las nuevas palabras. En el ejercicio visual-visual (*derecha*) se sustituían las respuestas verbales por otras visuales. En este caso, cada pareja de estímulo-respuesta era un par de "palabras" de dos símbolos. En el cuadro de respuestas se presentaba el estímulo (*color*); se adiestraba a los alumnos para que seleccionaran la respuesta correcta entre series de cinco parejas. Los asteriscos de color señalan las respuestas apropiadas. Una vez más, se alteraba el orden de los símbolos en las series de transferencia, pero se mantenía la correspondencia entre los símbolos individuales de estímulos y respuestas. Sólo en el caso del ejercicio visual-verbal los lectores deficientes se mostraron inferiores a los normales, lo que sugiere que tienen dificultad para aprender reglas cuando se les exige una respuesta verbal.





8. SE MOSTRABAN PSEUDOPALABRAS a dos grupos de niños de segundo y sexto curso (deficientes y normales) que habían seguido una instrucción intensiva de una semana para leer mediante uno de los dos métodos siguientes: adiestramiento en el "trazado del mapa alfabético", diseñado para hacerlos sensibles a los sonidos de las letras, o adiestramiento en el "significado de las palabras enteras", en el que se asociaban dibujos de animales imaginarios con sílabas sin sentido, como "zab". En el experimento, se ofrecía a ambos grupos pseudopalabras (*arriba*) formadas con caracteres de un alfabeto nuevo y que representaban las sílabas que se habían utilizado en el adiestramiento del significado de las palabras enteras. Los niños aprendían a decir la palabra correcta sin sentido cuando se presentaba junto a su pseudopalabra correspondiente, justamente lo que debe hacer un niño que aprende a leer palabras nuevas. Es decir, los trazadores del mapa alfabético tenían que aprender a leer la pseudopalabra sin apoyarse en su significado; los niños adiestrados en el significado de las palabras completas debían aprender a leer sin apoyarse en el trazado del mapa alfabético. Después de varios ejercicios de aprendizaje, se les presentaban los mismos caracteres con el orden invertido (*abajo*) y se les pedía que aprendieran los nombres de las pseudopalabras nuevas. Los lectores deficientes y los normales a los que se había adiestrado en el trazado del mapa alfabético cometieron muy pocos errores de inversión; los adiestrados en el significado de las palabras enteras cometieron muchos.

nera similar, las teorías modal cruzada y de la memoria en serie han engendrado una gama de ejercicios terapéuticos diseñados para robustecer esas funciones, posiblemente a través de la estimulación directa de los centros cerebrales involucrados.

Si son válidos los argumentos lógicos y empíricos contrarios a las teorías que justifican tales medidas terapéuticas, éstas mismas deberán cuestionarse seriamente. El hecho es que la investigación que valora la eficacia de esas aproximaciones curativas de la incapacidad para la lectura no ha obtenido pruebas sólidas que respalden tales tratamientos, y sí un nutrido número de datos que niegan su valor. En cualquier caso, es mucho lo que se ignora acerca del modo de proceder del cerebro para permitir inventar actividades con un efecto directo y positivo sobre funciones neurológicas responsables de procesos básicos como la percepción visual, la transferencia modal cruzada y la memoria en serie.

Medidas más tradicionales ordenadas a la instrucción reforzada han obtenido un éxito mayor; nos referimos, en particular, a una pedagogía especializada en los disléxicos que les reporte el tipo y cantidad de ayuda adecuada. Hemos descubierto que es conveniente el tratamiento precoz de las dificultades en la lectura. Ese tratamiento debe basarse en la tutoría continua e intensiva, individual, así como en un programa de lectura equilibrado, que utilice generosamente ambos enfoques: el holístico/significado y el analítico/fonético. El adiestramiento en la lectura debe complementarse con actividades de enriquecimiento para fomentar el desarrollo del lenguaje. Un programa de ese tenor puede ayudar al niño a adquirir una práctica en lectura funcional e independiente y, de ese modo, retirarle de la lista de discapacitados. Entre los investigadores empieza a generalizarse la idea de que no existe sustituto de la enseñanza directa y reforzada de la lectura.

Estructura de los poliovirus

El virus, famoso por sus efectos devastadores, se ha convertido en modelo de estudio de las relaciones moleculares entre forma y función. El análisis de su estructura abrirá nuevos caminos en la investigación vírica

James M. Hogle, Marie Chow y David J. Filman

Cuarenta años después de haber alcanzado su máximo apogeo en el mundo occidental, el poliovirus ofrece hoy una imagen dispar. Para los países pobres sigue siendo una amenaza mortal ya que, entre las poblaciones sin vacunar, la polio ataca cada año a unos dos millones de personas. En las naciones desarrolladas, sin embargo, el virus se ha convertido en una herramienta de indudable valor científico. Las investigaciones llevadas a cabo durante el desarrollo de la vacuna, en los años cincuenta, sacaron a la luz muchos de sus secretos. El espectro de hospedadores, los sitios por donde lleva a cabo la infección y su ciclo de vida se conocen ahora bastante bien. Por todo ello, el poliovirus constituye un arquetipo para el estudio de otros virus.

Sin embargo, sólo recientemente ha podido abordarse el estudio de las propiedades del virus que guardan una relación directa con su estructura tridimensional. Conocíanse todos sus genes, pero no se sabía, por ejemplo, cómo lograba el virus adherirse a una célula susceptible y penetrar en su interior, de qué manera se ensamblaba ni qué partes de su cápside provocaban la respuesta inmunológica. Elementos fundamentales implicados en la actividad infecciosa del virus permanecían oscuros, porque nadie había logrado dar con su aspecto.

Conocemos ya los pormenores estructurales del poliovirus. Cinco años de recogida de datos, millones de cálculos y una intensa colaboración entre nuestros laboratorios, del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps y el Instituto de Tecnología de Massachusetts, han culminado con la confección, en la Scripps, de un "mapa" atómico tridimensional del virus. Ese tipo de mapas se basan en los datos obtenidos por difracción de rayos X, técnica de gran resolución que tuvimos que adaptar al estudio de las peculiaridades de la estructura del poliovirus. Los modelos deducidos de tales mapas brindan una oportunidad sin precedentes para interpretar las bases físicas de múltiples funciones víricas, y ya han servido para resolver algunos de los interrogantes suscitados en el curso de trabajos anteriores.

Quizás el aspecto más práctico de nuestros estudios sea la ayuda que puedan prestar a las investigaciones efectuadas con otros virus, todavía por domeñar. El conocimiento exacto de la estructura del poliovirus facilitaría el desarrollo de vacunas y terapias antivíricas, al relacionar la estructura de un virus con su capacidad patogénica. Información que encontraría aplicaciones inmediatas en la familia del poliovirus, entre cuyos miembros se cuentan los microbios que producen los resfriados, la hepatitis *A* y la fiebre aftosa. Los estudios estructurales han puesto también de manifiesto curiosas semejanzas entre virus animales y vegetales, biológicamente diferentes.

En nuestras investigaciones han convergido dos disciplinas dispares, la virología y la cristalografía. Juntas, han contribuido de forma decisiva a sentar las bases del conocimiento general de los virus. Son, éstos, organismos muy pequeños y sencillos que invaden las células y usurpan su maquinaria metabólica. Una vez dentro, el virus ordena a la célula que cese en sus actividades propias y se ponga al servicio de la reproducción de aquél. El hospedador fabrica los materiales necesarios para la siguiente generación de partículas víricas y colabora en el ensamblaje de los virus. Una vez montados, los virus están listos para infectar a otras células. En el caso de poliovirus, esa actividad provoca el colapso metabólico y la muerte de la célula hospedadora. Pero no todos los virus matan a sus huéspedes.

El grado de complejidad varía de un virus a otro. En algunos casos, una simple cubierta proteica engloba al genoma del virus, su dotación genética. Según el tipo de virus, esa cubierta puede ser esférica, baliforme o bacilar. A su vez, el genoma puede estar repartido entre uno o más segmentos de ADN o ARN. Algunos virus ciñen la cubierta proteica con una envoltura, parecida a la membrana celular de los organismos superiores, que suele desempeñar un papel importante cuando entran o salen de las células hospedadoras.

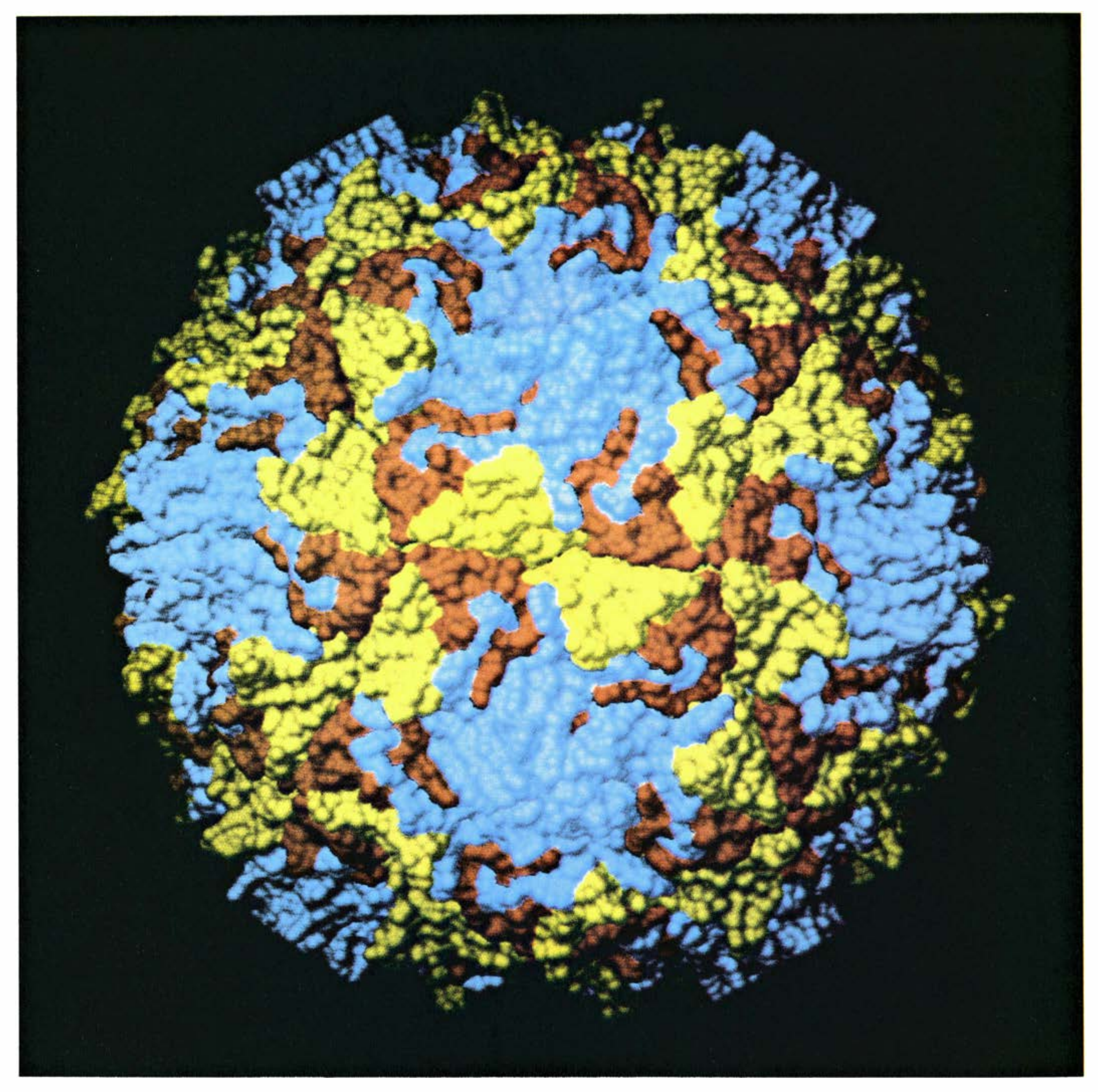
El poliovirus se cuenta entre los virus esféricos pequeños más sencillos, formado exclusivamente por proteína y ARN. Karl Landsteiner relacionó el patógeno con la poliomielitis, en 1908. En las postrimerías de la década de los cuarenta, la enfermedad afectaba, en Estados Unidos, a unas 20.000 personas cada año. En 1949, John F. Enders, Thomas H. Weller y Frederick C. Robbins, del Hospital Infantil de Boston, demostraron que el virus podía cultivarse en el laboratorio, eliminándose así los inconvenientes derivados de la utilización de primates en las investigaciones relacionadas con el poliovirus. Gracias a esos avances, Jonas Salk y Albert Sabin lograron, en 1956 y 1961, la obtención de vacunas. Con el desarrollo de la biología molecular mejoró el conocimiento del poliovirus, que llegaría a convertirse en el arquetipo de una familia entera, los llamados picornavirus, o pequeños virus de ARN.

Contemporáneamente a la introducción de la vacuna de Salk, James Watson y Francis Crick avanzaron un esbozo de la estructura del virus. En su opinión, la mejor manera de sacarle partido al escaso contenido de información genética que portaba el diminuto genoma vírico debía ser que la cubierta la formaran muchas copias de unas cuantas proteínas, con lo que el conjunto adoptaría una configuración dotada de un alto grado de simetría. En 1962, D. L. D. Caspar, a la sazón en la Fundación para la Investigación del Cáncer Infantil, de Boston, y Aaron

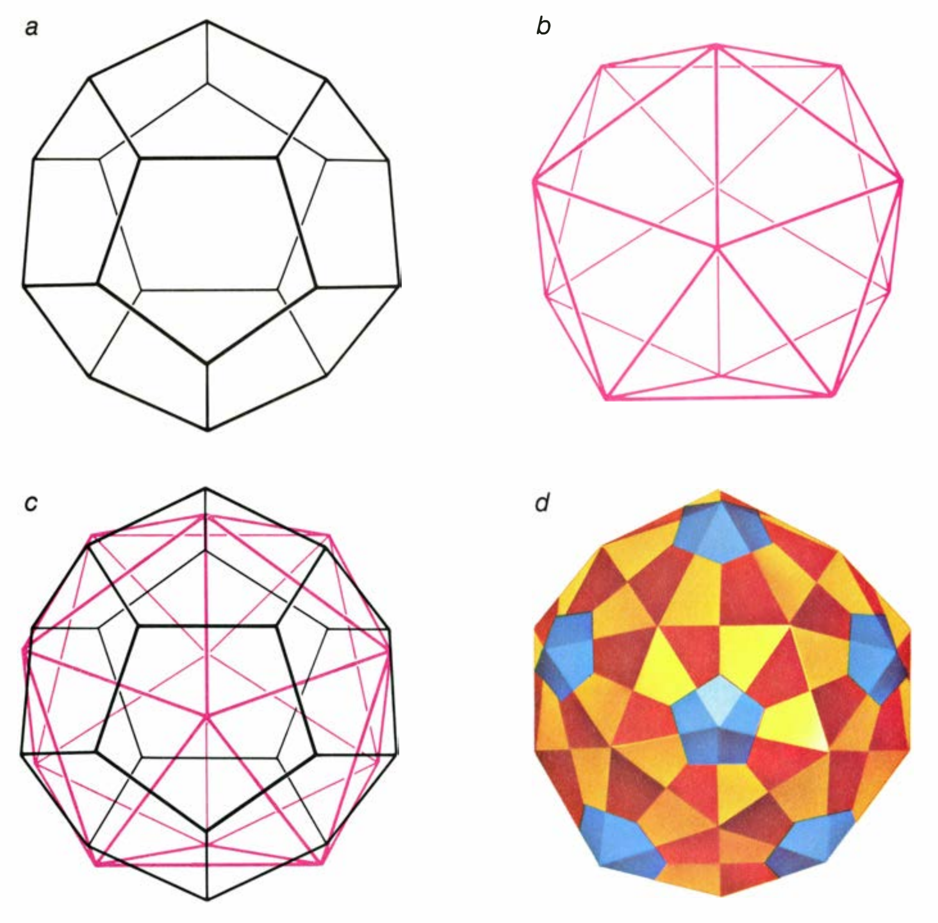
Klug, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, se decantaban por una estructura icosaédrica: la superficie de un virus "esférico" se asemejaría a la de un balón de fútbol, compuesta de facetas. Caspar y Klug demostraron también que esas partículas icosaédricas podían ensamblarse utilizando ciertos múltiplos de 60 subunidades.

Empero, la precisión de las hipótesis acerca de la estructura del virus no podía superar a la de los métodos disponibles para su comprobación. Caspar y Klug basaron sus propuestas en datos de microscopía electrónica y difracción de rayos X. De los dos métodos, el primero es el más directo. Se funda en bastantes principios de la microscopía óptica. Y difiere en que, en el caso de la microscopía electrónica, lo que choca contra la muestra es un haz de electrones, y no un haz luminoso. Además, para reconstruir la imagen se utilizan lentes magnéticas, en tanto que la microscopía óptica las usa de cristal. Ni siquiera con las técnicas actuales de preparación de muestras y procesamiento de imágenes más refinadas, las electromicrografías de poliovirus alcanzan la resolución suficiente para distinguir las proteínas que componen la cubierta del virus, y mucho menos para localizar sus átomos.

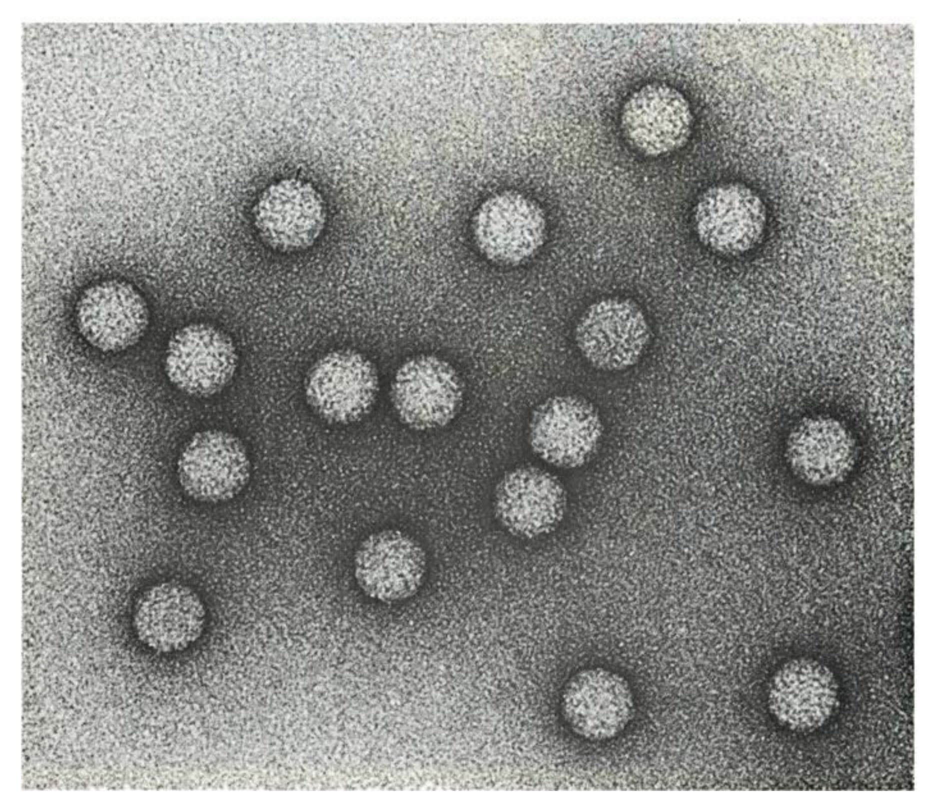
En cualquier técnica microscópica, la resolución, o claridad de detalle, está limitada por la longitud de onda de la radiación utilizada. Las longitudes de onda cortas permiten, en general, distinguir los detalles con más claridad que las longitudes de onda largas. Los aparatos que suelen utilizarse en el laboratorio generan rayos X de longitu-



1. MODELO DE POLIOVIRUS DISEÑADO POR ORDENADOR que muestra las subunidades proteicas que componen la cápside del virus. Esta contiene 60 copias de cuatro tipos de proteínas distintas, tres de las cuales se alojan en la superficie del virus (*azul, rojo* y *amarillo*). La cuarta se sitúa en el interior de la cápside y no se distingue desde el exterior. La imagen, en la que aparece el poliovirus aumentado unos cinco millones de veces, constituye la culminación de cinco años de investigaciones y señala el inicio de un estudio en profundidad de las características estructurales del virus. (Modelo creado por Arthur J. Olson.)



2. MODELOS GEOMETRICOS que ilustran la simetría subyacente en el poliovirus. Un dodecaedro (*a*) superpuesto sobre un icosaedro (*b*) crea la peculiar superficie de los poliovirus (*c*). En el punto donde convergen cinco líneas rojas pasan ejes de simetría de quinto orden, y de tercer orden donde convergen tres líneas negras. En la estructura real del virus, esbozada en la figura *d*, se advierten las proyecciones de los ejes de quinto orden. (Los esquemas de arriba son de G. V. Kelvin; los inferiores, de Tzyy-Wen Jeng.)



3. ELECTROMICROGRAFIAS de poliovirus. No alcanzan la resolución necesaria para analizar con precisión su estructura y sin embargo se trata de las mejores imágenes disponibles antes de que la cristalografía de rayos X revelase la estructura vírica. Las partículas de la fotografía están aumentadas 300.000 veces.

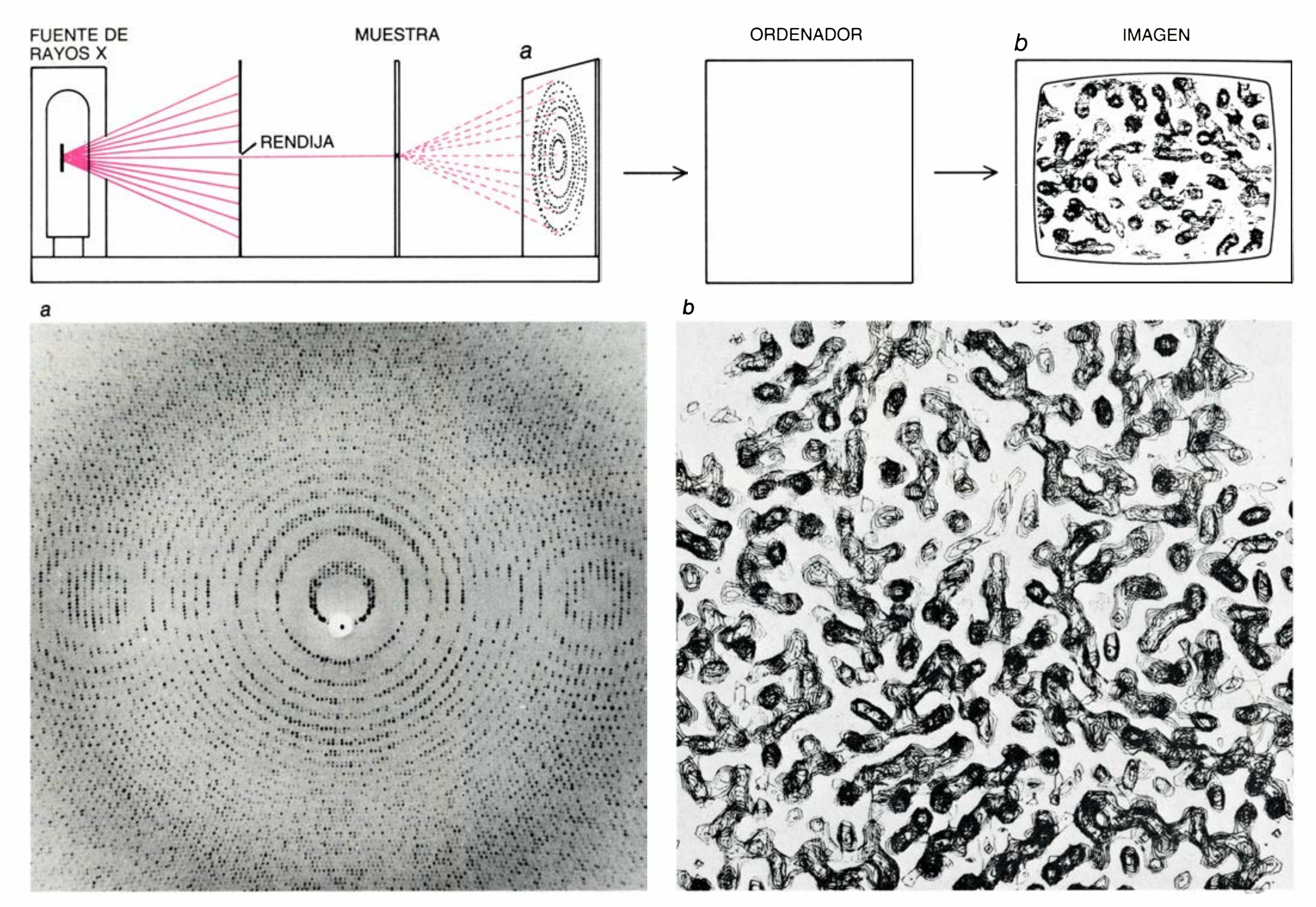
des de onda de alrededor de 1,5 unidades angstrom (una unidad angstrom equivale a una diezmilmillonésima de metro), varios órdenes de magnitud más cortas que las longitudes de onda de la luz visible y que viene a corresponder, aproximadamente, al espacio que existe entre dos átomos en las moléculas orgánicas. La estructura atómica de una muestra determina el patrón de difracción, o dispersión, de los rayos X, por lo que éstos resultan ideales para distinguir los átomos contenidos en una muestra orgánica.

Desgraciadamente, la utilización de la microscopía de rayos X en las ciencias de la vida tropieza con dos graves dificultades. En primer lugar, los materiales biológicos dispersan muy poco los rayos X, lo que entorpece la detección de las intensidades. En segundo lugar, no existen lentes que permitan reconstruir con un grado alto de resolución los rayos difractados. Sí pueden registrarse en una emulsión fotográfica, donde forman patrones característicos de puntos, dispuestos en anillos concéntricos. La falta de métodos que permitan enfocar y amplificar los rayos impide, no obstante, la interpretación de tales patrones de difracción.

Para incrementar una señal débil se recurre a la cristalización de la muestra. Si se forma un cristal estable con un billón de partículas víricas, la ordenación repetitiva de los átomos provoca una dispersión concertada de los rayos X, lo que incrementa la intensidad de cada reflejo hasta niveles detectables. Esa técnica recibe el nombre de cristalografía de rayos X.

En ese momento se introduce el ordenador, que hará las veces de "lente". En el caso de moléculas que no tengan más de 100 átomos, el computador reconstruye su imagen analizando las relaciones estadísticas de los datos de difracción. (Jerome Karle y Herbert A. Hauptman obtuvieron en 1985 el premio Nobel de química por su labor en el desarrollo de dicha metodología.) En el caso de las proteínas, que tienen miles de átomos, o de los virus, que tienen millones, esas técnicas estadísticas resultan, sin embargo, insuficientes. Se hace obligado introducir entre la malla del cristal "átomos pesados" como mercurio u oro, que cambian las intensidades de los rayos X difractados y ofrecen así nueva información.

Disponiendo de esos nuevos datos, el ordenador realiza sus análisis y crea un "mapa de densidad electrónica", un diagrama tridimensional de la distribución de electrones en el cristal. La interpretación del mapa de densi-



4. CRISTALOGRAFIA DE RAYOS X. Consta de varias etapas, aquí esquematizadas. Los rayos X atraviesan una rendija, que elimina los rayos desviados. El rayo enfocado choca contra una muestra cristalina y es dispersado, según un patrón definido por la estructura de la muestra. Ese patrón se impresiona sobre una emulsión fotográfica, tal como se ilustra en el ejemplo de abajo, a la izquierda (*a*). Analizando varios patrones de difracción como ése, el ordenador calcula la distribución de electrones y, por tanto, de átomos, de la muestra. Abajo a la derecha (*b*) se ofrece parte de un mapa de densidad electrónica.

dad electrónica, que viene a ser un reflejo de las moléculas que forman el cristal, permite elaborar modelos atómicos tridimensionales con un alto grado de precisión.

Los análisis cristalográficos de poliovirus se iniciaron a mediados de los años cincuenta, cuando un grupo de virólogos de la Universidad de California en Berkeley cristalizaron, casualmente, unas muestras de ese agente. El grupo de Berkeley envió los cristales al Birkbeck College de Londres, para someterlos a análisis por rayos X. En ese centro, Rosalind Franklin y, tras su muerte, Klug y su colega John Finch, recopilaron los datos que llevarían a la hipótesis de Caspar y Klug según la cual los virus esféricos tenían simetría icosaédrica.

A finales de la década de 1950, las investigaciones cristalográficas tropezaron con diversos problemas técnicos; por ejemplo, los derivados del enorme número de datos a tratar. Así, mientras que las determinaciones estructurales de pequeñas moléculas requieren sólo unos pocos centenares de mediciones, las estructuras de proteínas de tamaño medio (de las que se han resuelto unas 300 hasta la fecha) necesitan decenas de miles. Estructuras del tamaño de los virus precisan millones de mediciones. Durante los años 60 y 70, los avances en cristalografía se vieron frenados por la escasa potencia y el elevado costo de los ordenadores.

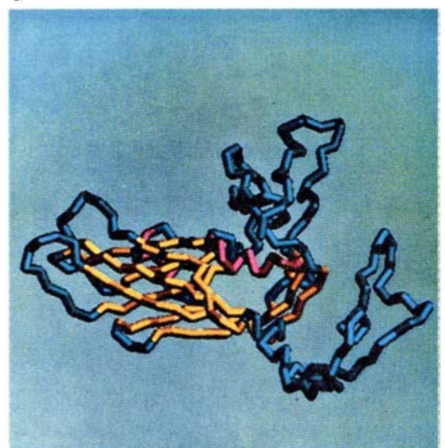
La propia simetría del poliovirus puede utilizarse de fuente de información, valiosa por cierto, pues impone notables limitaciones al procesamiento de los datos que ha de resultar en una imagen. En 1961, David M. Blow y Michael G. Rossmann intentaron sacar provecho de dicha simetría y obtuvieron algunos éxitos utilizando bajas resoluciones. Fracasaron, no obstante, cuando intentaron aplicar sus métodos a altas resoluciones, ya que los cálculos escapaban a todo posible control.

En 1974, Gerard Bricogne, entonces en el Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, puso a punto una técnica sobria para la inclusión de la simetría en el proceso de formación de imágenes. Desarrolló un algoritmo simplificado que permitía tratar por ordenador grandes estructuras simétricas y con alta resolución. Gracias a ese procedimiento se obtuvo la primera estructura, de alto grado de resolución, de un virus intacto, el del enanismo del tomate (TBSV). Fue obra, en 1978, de Stephen C. Harrison y sus colegas, de la Universidad de Harvard.

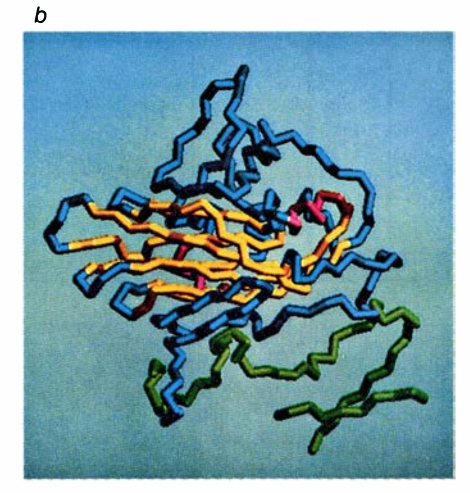
Posteriormente se han venido resolviendo otras estructuras de virus vegetales, entre ellas el virus del mosaico de las judías (SBMV), el virus de la necrosis satélite del tabaco (STNV) y el virus de la rugosidad del nabo (TCV). Pese al avance en el conocimiento de la arquitectura y ensamblaje de los virus simples que han propiciado esas investigaciones, los resultados han sido menos espectaculares al tratar de relacionar estructura y función, debido, sobre todo, a nuestros escasos conocimientos de la biología de los virus vegetales.

No ocurre lo mismo con los virus animales; en particular, el de la polio y otros picornavirus. La ingente información acumulada sobre su biología les convierte en atractivos candidatos para los estudios estructurales. Al poco de darse a conocer la primera estructura

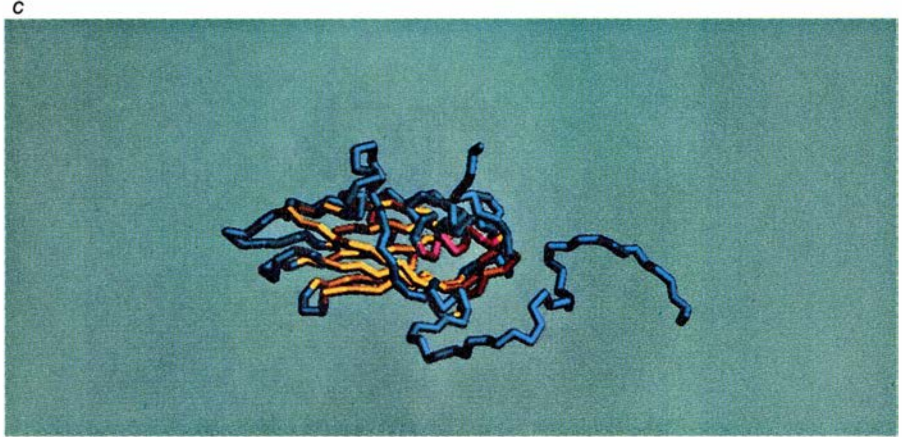
a



b



c



5. PROTEINAS DE LA CUBIERTA, que forman los "sillares" que perfilan la arquitectura del poliovirus. Cada proteína está construida por una cadena de aminoácidos plegada de manera característica. Tres de las cuatro proteínas, VP1 (*a*), VP2 (*b*) y VP3 (*c*), son de tamaño similar y presentan una estructura central muy afín (*rojo* y *amarillo*), difiriendo en el resto (*azul*). La cuarta proteína, VP4, es la indicada por la cadena verde en *b*. VP4, la menor de las proteínas, viene a constituir una prolongación de la proteína VP2.

de un virus vegetal, iniciamos la investigación de una estirpe de poliovirus, común en los laboratorios: la denominada estirpe Mahoney de poliovirus de tipo 1. Obtuvimos cristales, que resultaron ser idénticos en apariencia y propiedades cristalográficas a los obtenidos casualmente en Berkeley, y caracterizados por Finch y Klug en Birkbeck hace más de 25 años.

La obtención de datos a partir de esos cristales y la determinación consecuente de la estructura, constituían una empresa formidable. Durante nuestras investigaciones recogimos y procesamos casi cinco millones de mediciones, de un total de 84 cristales. Aunque los poliovirus no son mayores que el grueso de los virus vegetales, nuestros cristales generaban, al paso de los rayos X, un número superior de reflejos, que además se solapaban; los problemas a que ello daba lugar obligaron a poner a punto nuevas técnicas y programas informáticos.

A pesar de esas tremendas dificultades, conseguimos alcanzar una resolución de 2,9 angstrom. (Es decir, en nuestros mapas se distinguían objetos situados a una distancia de 2,9 angstrom.) El mapa de densidad electrónica era muy claro, hasta el punto de que nos resultó sencillo identificar las cuatro cadenas proteicas resiguiendo los perfiles. Gracias a los trabajos de David Baltimore y sus colegas, del MIT, conocíamos ya las secuencias de aminoácidos de dichas cadenas polipeptídicas. Identificados los grupos laterales de algunos aminoácidos característicos, pudimos casar las cadenas observadas en el mapa con sus respectivas secuencias moleculares. Cabía ya correlacionar nuestra estructura tridimensional con la información obtenida tras años de estudios biológicos. Nuestro modelo proporcionaba soporte físico a los datos químicos obtenidos anteriormente de los picornavirus. En conjunto, la determinación de la estructura nos llevó casi cinco años.

Se sabía ya, por los trabajos de otros investigadores, que la cápside del poliovirus estaba formada por muchas copias de sólo cuatro proteínas: VP1, VP2, VP3 y VP4. Nuestro grupo demostró que VP1, VP2 y VP3 eran de gran tamaño y de estructura muy similar. Las tres proteínas contienen un núcleo estructural central integrado por un pliegue de ocho cadenas en configuración beta ("barril beta"), del que sobresalen bucles y colas característicos. Los núcleos, unidos entre sí, constituyen el soporte estructural de la cubierta proteica del virus. Las colas recubren el interior de la cubierta, y los bucles se disponen sobre la superficie exterior. Según parece, los bucles desempeñan un papel importante en las interacciones con elementos externos al virus. VP4, que es unas cuatro veces menor que las demás proteínas, viene a ser un apéndice de VP2, y forma parte también del interior de la cubierta proteica.

La cápside del virus consta de 60 copias de cada una de esas proteínas, ensambladas en 12 agregados compactos, o pentámeros, formados por cinco copias de cada una de las proteínas. Los pentámeros semejan montañas moleculares: las VP1 se sitúan en la cúspide, las VP2 y VP3 se alternan en la ladera y, VP4, en la base. Cuando se unen los pentámeros, en el proceso de formación de la cápside, los picos correspondientes a las VP1 caen en los ejes de simetría de quinto orden, y las uniones entre las VP2 y VP3 determinan otra protuberancia algo menor y plana, en los ejes de simetría de tercer orden. Aunque en nuestros experimentos no se observa el ARN, los cálculos indican que debe empaquetarse, muy apretadamente, en la cavidad central.

Los mapas de los poliovirus dan una idea exacta de los patrones de plegamiento de las cuatro proteínas de la cubierta. Puesto que el plegamiento define la forma de cada molécula y la situación relativa de los grupos químicos principales, es obvia la relación de todo ello con la función biológica de la proteína. Así, estudiando con detalle ciertas zonas específicas de las proteínas del virus, conseguimos relacionar la síntesis de las proteínas víricas con el ensamblaje del virus.

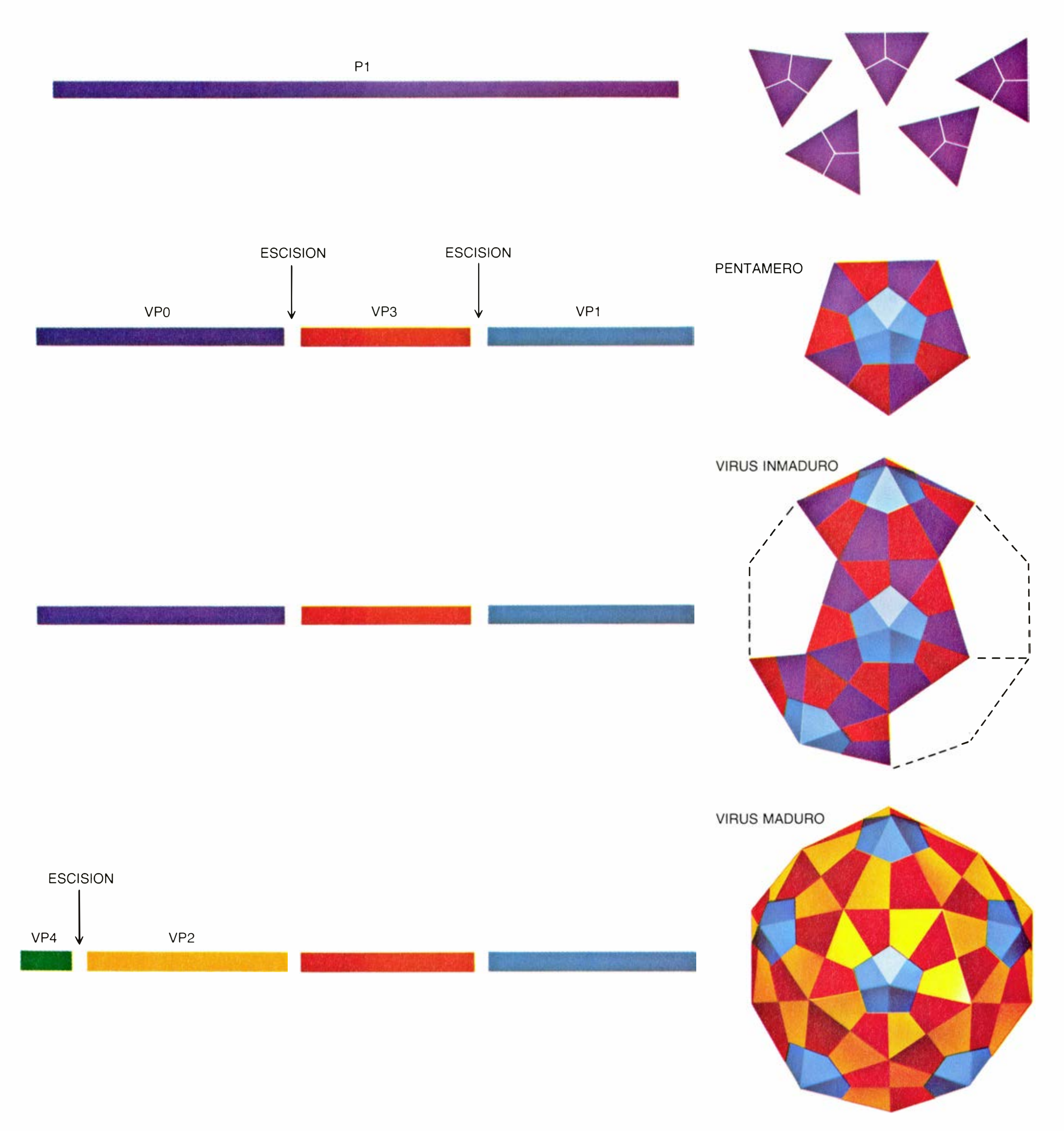
Cuando el poliovirus infecta una célula, monopoliza rápidamente su maquinaria biosintética. A las dos o tres horas de haberse iniciado la infección, su ARN dirige ya la síntesis de las proteínas víricas. Las cuatro proteínas de la cubierta se alojan inicialmente en una larga cadena de aminoácidos, denominada P1. Luego, una enzima la corta, dando lugar a tres proteínas, VP0, VP1 y VP3, en un proceso que parece estar íntimamente ligado con el ensamblaje de dichas proteínas en agregados pentaméricos.

La propia estructura del virus sugiere

la relación entre los cortes enzimáticos y el ensamblaje de los pentámeros. En nuestro modelo, cinco de los extremos VP3 generados por esos cortes se entrelazan en una malla estable y compacta, formación que estimula a las subunidades proteicas a asociarse en la configuración pentamérica correcta. Las reorganizaciones moleculares instadas por los cortes dirigen, por tanto, la creación de los pentámeros.

A continuación, los pentámeros se organizan en una cubierta que contiene 60 copias de VP0, VP1 y VP3. No se sabe si los pentámeros encapsulan al ARN durante ese proceso o si primero se forma una cápside vacía y luego se introduce el ARN. Estas últimas etapas pueden invertirse fácilmente, ya que, cuando se está formando, la cubierta es una estructura inestable. Por último, VP0 se escinde en VP2 y VP4. Se produce, así, la maduración del virus. Tras ese corte postrero, el proceso entra en una fase irreversible y el virus no puede desmontarse, a menos que sufra una alteración irreparable.

Nuestros descubrimientos permiten profundizar en esta etapa final del proceso de ensamblaje. El modelo pone de manifiesto que el sitio de corte VP2-VP4 se encuentra en el interior de

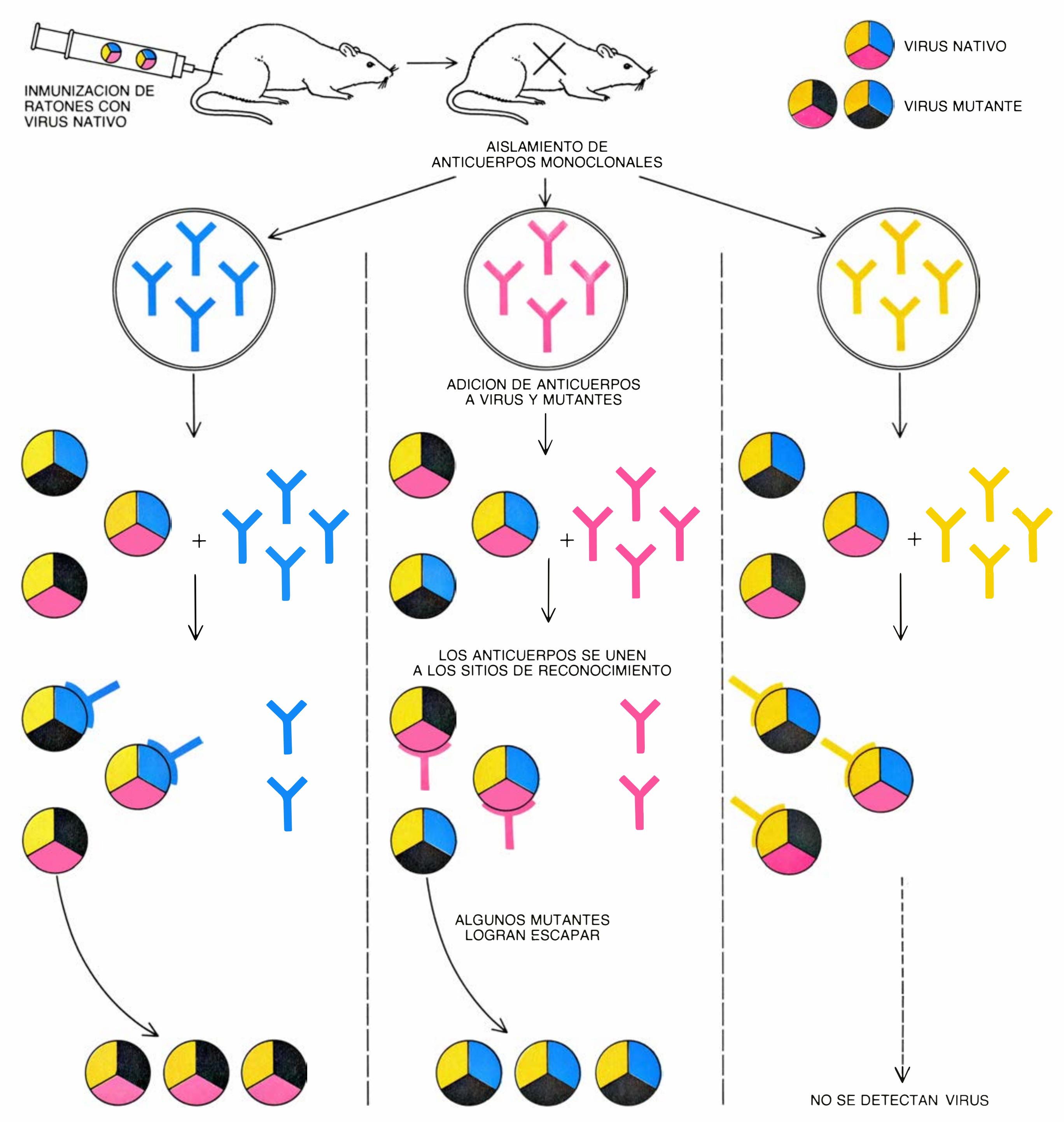


6. SECUENCIA de ensamblaje del virus, en paralelo con la serie de cortes específicos que crean las proteínas del virus. Las cuatro proteínas de la cápside derivan de la cadena P1, que se pliega formando una subunidad tridimensional característica. Tras unos cortes enzimáticos, que originan las cadenas VP1, VP3 y VP0, se produce una reorganización que agrupa a cinco copias de cada cadena en una configuración pentamérica. Posteriormente, 12 de esos pentámeros formarán la cápside. La estructura no es estable hasta que se produzca el corte enzimático de VP0, que da lugar a VP2 y VP4: la etapa final del ensamblaje.

la cubierta del virus, inaccesible a enzimas externas. Ello implica que el corte debe ser catalizado, probablemente, por las propias proteínas del virus. Según se desprende de nuestros estudios, la disposición espacial de los grupos químicos en el interior de la cápside permitiría que dicho corte se efectuara en presencia del ARN.

Nuestro trabajo ha revelado también algunos detalles inesperados de la evolución de los virus. Hemos encontrado ciertas similitudes predecibles entre el poliovirus y rinovirus 14, otro picornavirus, cuya estructura fue dilucidada por Rossmann y sus colegas, en la Universidad Purdue, en colaboración con Roland R. Rueckert, de la Universidad de Wisconsin en Madison. El grupo de Rossmann publicó sus resultados poco antes de que nosotros hiciésemos lo propio. El parecido entre los virus, que se da tanto en las subunidades proteicas como en el patrón de ensamblaje de la cápside, tiene su correspondencia en los respectivos genomas.

Menos predecible resultó averiguar que las proteínas de la cubierta de los picornavirus recordaban también a las de los virus icosaédricos vegetales: poseen patrones de plegamiento idénticos y una morfología externa similar. Además, la secuencia de empaquetamiento



7. AISLAMIENTO DE MUTANTES EVASIVOS: procedimiento fundamental en los estudios de la respuesta inmunológica a los poliovirus. Se inyectan en ratones poliovirus normales, o nativos. Inmediatamente proliferan en el ratón células que fabrican anticuerpos. Cada anticuerpo está diseñado para interactuar con una parte específica de la cubierta vírica. En el dibujo, esa especificidad la simbolizan los diferentes colores. Se recogen las células productoras de anticuerpos, se fusionan con células procedentes de un tumor y, tras segregarlas, se seleccionan líneas "inmortales" que sintetizan anticuerpos monoclonales. Cuando los poliovirus nativos y mutantes se mezclan con esos anticuerpos, la mayoría queda inactiva ante la interacción con los anticuerpos. Sin embargo, algunos de los mutantes presentan cambios en las proteínas de la cápside, que les permiten eludir los anticuerpos. Estos mutantes se evaden. Mediante la comparación de poliovirus mutantes con nativos se llega a la identificación de los sitios reconocidos por los anticuerpos. (Ilustración de George V. Kelvin.)

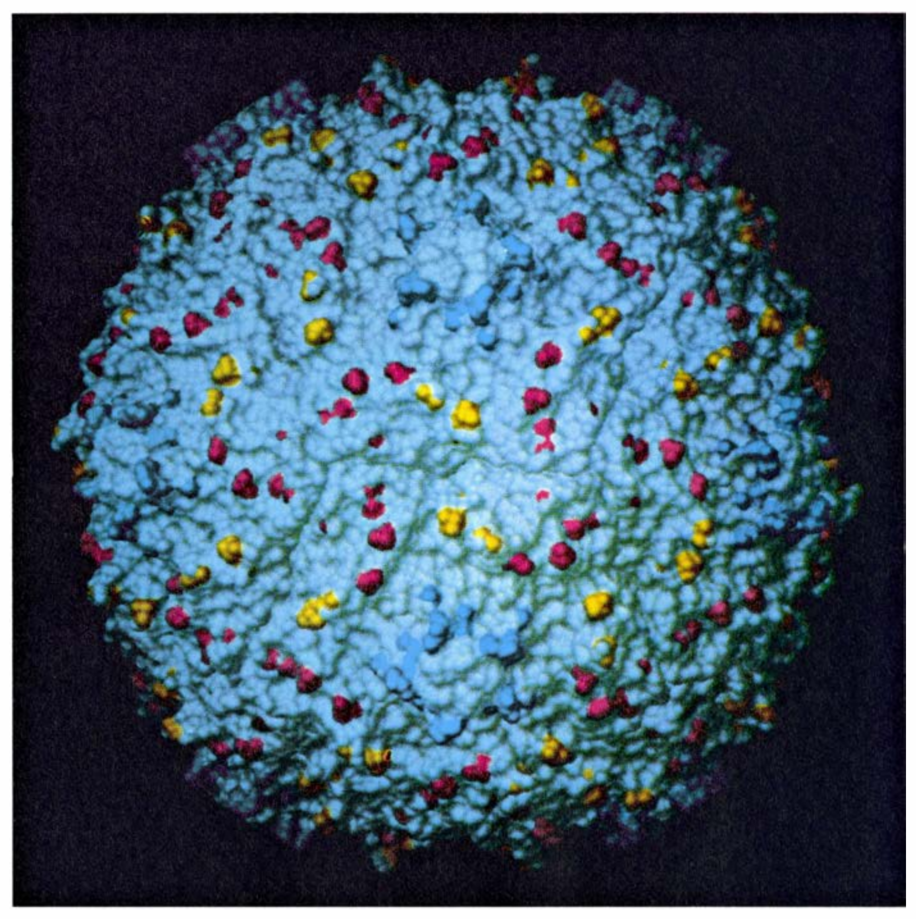
de las proteínas de la cubierta de los polio y rinovirus constituye casi un remedo de cómo se empaquetan las 180 subunidades de las cápsides de los virus vegetales TBSV, SBMV y TCV.

Tales semejanzas estructurales apuntan a una relación evolutiva entre picornavirus y virus vegetales. Nada tiene, pues, de extraño la hipótesis según la cual los virus vegetales y los animales están emparentados. Lo sorprendente es que dichas semejanzas hayan persistido aun perteneciendo los virus a familias tan distintas, considerablemente divergentes en su biología molecular. Todo apunta a la posibilidad de que los virus hayan evolucionado "hurtando" fragmentos de material genético de las células hospedadoras, o de otros virus, durante sus breves encuentros con los genomas de esos organismos.

Además de suministrar información sobre las propiedades físicas y el ensamblaje de los poliovirus, el modelo estructural permite abordar el proceso mediante el cual el sistema inmunológico reconoce y neutraliza al virus. Al disponerse ahora de una visión tridimensional, puede ya visualizarse directamente, en un virus intacto, la estructura del sitio de reconocimiento específico por parte de los anticuerpos. Tales sitios son las "dianas" a las que atacan los anticuerpos, las fuerzas de choque del sistema inmunológico. La disposición espacial de tales sitios puede reflejar aspectos fundamentales de su función.

Los sitios reconocidos por los anticuerpos suelen identificarse aislando mutantes monoclonales evasivos: formas genéticamente alteradas de los poliovirus que escapan a la acción de los anticuerpos monoclonales. Dotados de una mutación que provoca un cambio en uno de los sitios de reconocimiento, lo que a su vez impide que los anticuerpos se unan a la cubierta del virus, esos mutantes suelen sobrevivir. Localizando la mutación en el ARN vírico se llega a identificar el aminoácido alterado y a determinar su posición en la cubierta del poliovirus.

Numerosos laboratorios han aislado mutantes monoclonales evasivos, entre otros los de Geofrey C. Schild y sus colaboradores, de los National Institutes for Biological Standards and Control, de Londres, Eckard Wimmer y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Radu Crainic y colaboradores, del Instituto Pasteur. También nuestro grupo ha conseguido aislar y caracterizar algunas variantes, en el marco de un pro-



8. TRES SITIOS DE RECONOCIMIENTO de los poliovirus; cada uno consta de varios aminoácidos. Los sitios, que actúan de "dianas" del sistema inmunológico, se indican en rojo, azul oscuro y amarillo. La estructura repetitiva de la cubierta del virus hace que tales sitios se repitan a lo largo de la cápside. Sin un modelo tridimensional del poliovirus, hubiese resultado difícil captar ese tipo de organización espacial.

yecto común con Anne Moser, de la Universidad de Wisconsin.

Gracias al modelo de poliovirus pudimos correlacionar, en un virus intacto, grupos de mutaciones con sitios "diana" concretos. Sabíamos que muchos de los sitios de reconocimiento presentes en los anticuerpos eran muy grandes, de un diámetro aproximado de 30 angstrom. En la superficie del virus, ello representa un área extensa. Puesto que la superficie que ocupa la cadena lateral de un aminoácido es de unos pocos angstrom de diámetro, los sitios de reconocimiento debían incluir varios aminoácidos. Según nuestras predicciones, las mutaciones que no distaran entre sí más de 30 angstrom debían formar parte del mismo sitio de reconocimiento.

Identificamos tres grupos de mutaciones con esas características, los tres formados por segmentos proteicos que en la secuencia lineal de la proteína se encontraban separados, aunque muy próximos en la estructura tridimensional. Dos de esos grupos afectaban a fragmentos de más de una de las proteínas de la cápside. Experimentos inmunológicos recientes han confirmado que tales grupos de mutaciones se corresponden con tres sitios, o determinantes, antigénicos. En concreto, dos o más mutantes que estén incluidos en el mismo grupo se evadirán del mismo anticuerpo monoclonal. Se han visto así confirmadas empíricamente las predicciones basadas exclusivamente en distribuciones espaciales sobre el modelo del virus.

Los sitios de reconocimiento identificados mediante las variantes monoclonales evasivas se localizan todos en zonas conspicuas de la superficie del virus, esto es, en áreas fácilmente accesibles para el anticuerpo. Según parece, los virus animales "decoran" su superficie exterior con relieves muy sensibles a mutaciones, lo que les permite eludir la vigilancia del sistema inmunológico. El rinovirus 14 presenta una distribución similar de sitios de reconocimiento, según se ha comprobado utilizando "péptidos sintéticos" para generar anticuerpos. (Tales péptidos sintéticos son fragmentos de proteínas que se corresponden con ciertas partes de las proteínas de la cápside del virus.)

Utilizando tales péptidos se ha identificado también sitios antigénicos localizados en el interior del virus. Resulta difícil explicar cómo pueden acceder los anticuerpos a esos sitios ocultos, a menos que se postule que en algún momento de su ciclo vital el virus sufra grandes cambios conformacionales, que los haga accesibles.

Pese a lo estimulante de la información obtenida en nuestros estudios estructurales, su impacto debe ir más allá de esas interpretaciones preliminares. Así, por ejemplo, la dinámica conformacional, que parece intervenir en la inmunogenicidad del poliovirus, podría ser importante en el reconocimiento de la célula hospedadora, su unión con ella y en el proceso de liberación del ARN vírico, ya dentro de la célula. Así lo sugiere, al menos, el que las 60 copias de VP4, proteína confinada en el interior del poliovirus, se pierdan cuando el virus se une a la célula susceptible y entra dentro de ella.

El modelo del poliovirus quizás ayude también a interpretar la relación existente entre la estructura de los virus y su capacidad patogénica. Así, hay variedades de poliovirus que se desarrollan fácilmente en el sistema nervioso central y otras que no. Vincent R. Racaniello, de la Universidad de Columbia, ha demostrado que, al menos en una estirpe, la capacidad del virus para causar parálisis puede estar íntimamente ligada a la naturaleza de las proteínas de la cápside. Si, valiéndose del modelo del poliovirus, los investigadores logran definir las características estructurales que controlan la entrada del virus en el sistema nervioso central, quizá puedan aplicar dichos conocimientos al diseño de una nueva generación de vacunas contra la polio y a la lucha contra otros patógenos que infectan el sistema nervioso central.

Confiamos en que un mejor conocimiento de los aspectos estructurales de los poliovirus abra nuevas vías para combatir virus parecidos, contra los que hoy no existen defensas. Alterando sistemáticamente la estructura del virus con técnicas de ingeniería genética, los investigadores conocerán mejor las relaciones entre características estructurales y propiedades funcionales. De dominarse el papel que desempeña la estructura en el funcionamiento del virus, podrían diseñarse drogas antivíricas más eficaces. Incluso podrían, los poliovirus, constituir vehículos de administración de otras vacunas si en su cápside se encontrasen sitios donde pudieran injertarse fragmentos de virus emparentados (por ejemplo, el de la hepatitis *A*). A las pocas décadas de desolar el mundo occidental, los poliovirus podrían dirigir la batalla contra agentes víricos aún indómitos.

Enfriamiento y confinamiento de átomos

La presión de radiación de la luz láser frena y enfría los átomos, que quedan luego confinados en un recipiente cuyas "paredes" son campos magnéticos. Los átomos enfriados son ideales para investigar ciertos problemas de la física

William D. Phillips y Harold J. Metcalf

El estudio de las propiedades intrínsecas de los átomos aislados ha constituido, desde siempre, un campo de investigación científica muy fructífero. A principios de siglo, los avances en este punto condujeron a la formulación de la mecánica cuántica, una de las piedras angulares de la física moderna. Más recientemente, las mediciones precisas de los parámetros atómicos han arrojado luz sobre otras teorías físicas fundamentales, entre las que se cuenta la relatividad.

Los éxitos en el estudio de los sistemas atómicos se han alcanzado conforme aumentaba la capacidad de llevar a cabo mediciones muy precisas. Una comprensión más profunda de la estructura de la materia en su dominio atómico exige que dichas mediciones se lleven a cabo con una exactitud todavía mayor. Por desgracia para nosotros, la finura necesaria no es fácilmente alcanzable: en los sólidos y líquidos no pueden sustraerse de los átomos individuales las influencias de sus vecinos; en los gases, el movimiento térmico al azar dificulta las mediciones de alta precisión.

La necesidad siempre actual de llevar a cabo mediciones cada vez más precisas ha conducido al desarrollo de numerosas técnicas con el fin de superar los efectos del movimiento térmico. Para llevar a cabo las mediciones más exigentes no basta con reducir los efectos provocados por la agitación térmica; en última instancia, se impone reducir el propio movimiento térmico. Los métodos desarrollados a lo largo de estos últimos años ponen a nuestro alcance los medios necesarios. Podemos enfriar los átomos enviando directamente sobre ellos un haz de luz láser. La presión de radiación que ejerce la luz láser sobre los átomos se puede emplear contra ellos y menguar, así, su velocidad. Una vez enfriados, los átomos pueden atraparse o confinarse en una región limitada del espacio. En nuestro laboratorio los confinamos en un recipiente cuyas "paredes" eran campos electromagnéticos, no sustancias materiales.

Los átomos enfriados o confinados son ideales para investigar ciertos problemas centrales de la física. En este sentido, a principios de 1986 el enfriamiento y confinamiento se utilizó en lo que constituyó la primera observación de un proceso mecánico cuántico fundamental: la transición de un átomo desde un nivel de energía discreto a otro (un salto cuántico). En este caso, el confinamiento resultó bastante sencillo porque el átomo se había ionizado previamente, es decir, había perdido uno de sus electrones. Las técnicas recientes han posibilitado también el confinamiento de átomos eléctricamente neutros.

En el futuro, los átomos enfriados con láser facilitarán las mediciones espectroscópicas, lo que redundará en sustanciales avances en campos tales como los relojes atómicos y las mediciones de constantes fundamentales. El enfriamiento y confinamiento permitirá a los investigadores estudiar con detalle las colisiones entre los átomos y comprender mejor la formación de los enlaces químicos. El enfriamiento con láser y el confinamiento electromagnético se podrían utilizar también en la manipulación de átomos de antimateria. Dado que la antimateria se aniquila al entrar en contacto con la materia, los recipientes hechos de materiales ordinarios no pueden contenerla.

Para densidades suficientemente elevadas, algunos átomos podrían incluso sufrir un tipo de transición fundamental: la condensación de Bose. Se trata de un efecto, predicho por la mecánica cuántica, que establece la existencia de dos clases de partículas fundamentales, los fermiones y los bosones. Los fermiones, donde se agrupan electrones, protones y neutrones, no pueden ocupar el mismo estado cuántico; por el contrario, los bosones, clase a la que pertenecen algunos átomos (citemos, por ejemplo, el de hidrógeno), pueden ocupar el mismo estado cuántico. En un conjunto de bosones denso y frío, la mayoría de las partículas compartirán un mismo estado cuántico de baja energía. La ansiada observación de la condensación de Bose podría muy bien tener lugar en recintos poblados por átomos enfriados con láser.

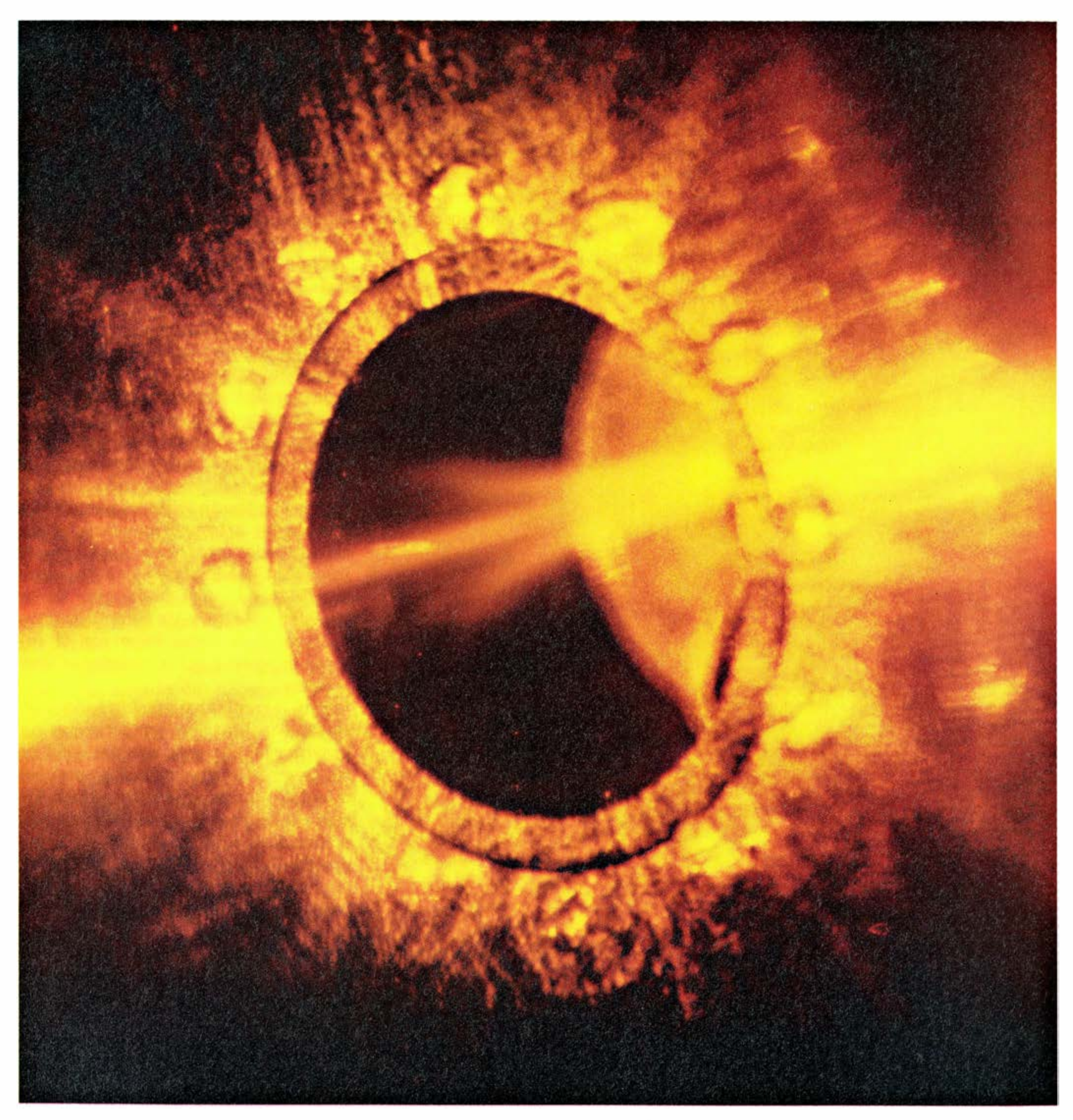
¿Por qué los átomos se hallan siempre en movimiento? La teoría cinética desarrollada a lo largo del último siglo muestra que los gases son conjuntos de átomos o moléculas cuya energía cinética media (que varía con el cuadrado de la velocidad) es proporcional a la temperatura absoluta. Este movimiento clásico no se puede eliminar nunca, salvo a la inalcanzable temperatura del cero absoluto, que corresponde aproximadamente a −273 grados Celsius. A temperatura ambiente, las moléculas del aire se mueven con una velocidad media de unos 500 metros por segundo, o sea, 1800 kilómetros por hora. Además, los átomos se mueven con distintas velocidades, la mayoría de las cuales están comprendidas entre cero y el doble de la velocidad media.

¿Por qué el movimiento térmico afecta a las mediciones atómicas de precisión? Cada uno de los átomos de un gas se comporta como un transmisor y receptor de radiación electromagnética sintonizado con minuciosa exactitud; un átomo sólo es capaz de emitir y absorber con eficiencia a determinadas frecuencias de radiación. Dado que los diferentes tipos de átomos emiten y absorben a frecuencias diferentes, cada conjunto específico de frecuencias

–que se conoce por espectro de frecuencias– sirve de "firma" de una clase particular de átomo. En otras palabras, los átomos idénticos poseen el mismo espectro y comparten la misma firma. La medición de los espectros recibe el nombre de espectroscopía, y permite obtener información acerca de la estructura fundamental de los átomos.

Desgraciadamente, los espectros de átomos idénticos de un gas a temperatura ambiente resultan alterados como consecuencia del movimiento térmico de los mismos. Cuando un átomo se mueve con respecto a un observador, sus frecuencias características quedan desplazadas en relación a las frecuencias intrínsecas que se observan del átomo en reposo. Este fenómeno se conoce con el nombre de corrimiento Doppler, en honor del físico austriaco del siglo XIX Christian Doppler, que explicó un efecto similar en el caso del sonido. Se trata de un fenómeno familiar para cualquiera que haya percibido el cambio de tono del silbato de un tren que pase junto a él. El corrimiento Doppler permite también que el radar de la policía de tráfico determine la velocidad de un automóvil.

El corrimiento Doppler se produce, asimismo, cuando un átomo se acerca a una fuente luminosa. El átomo cruza con más rapidez las crestas y valles de las ondas de la radiación y, por tanto, la frecuencia percibida por el átomo parece ser mayor de lo que es en realidad. Por el contrario, si el átomo

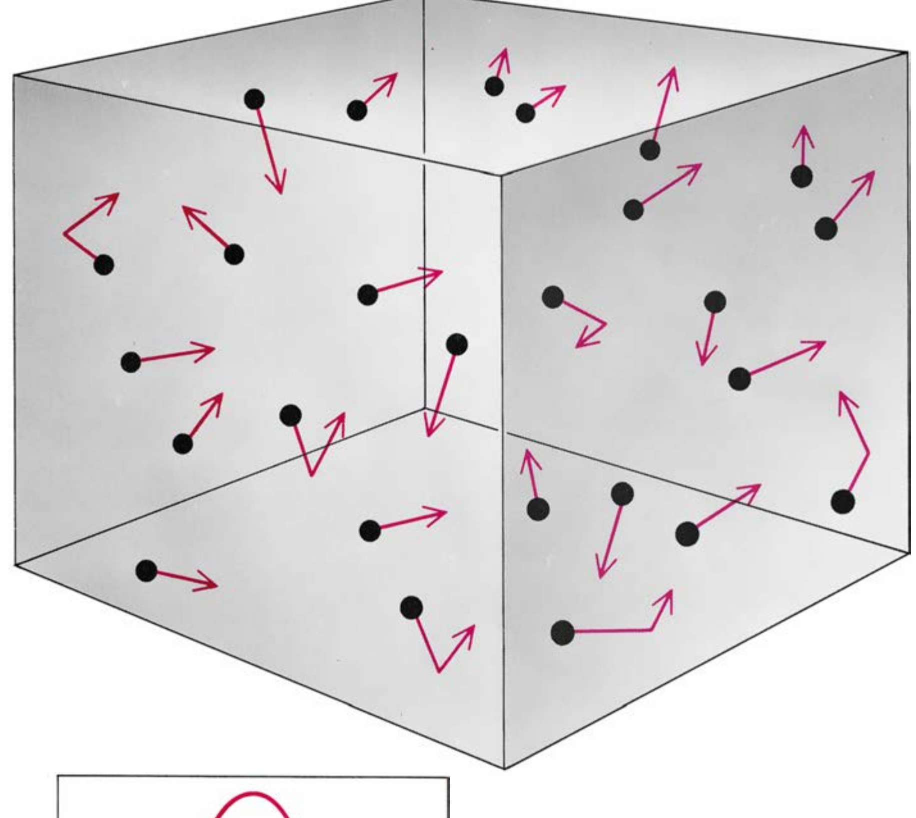


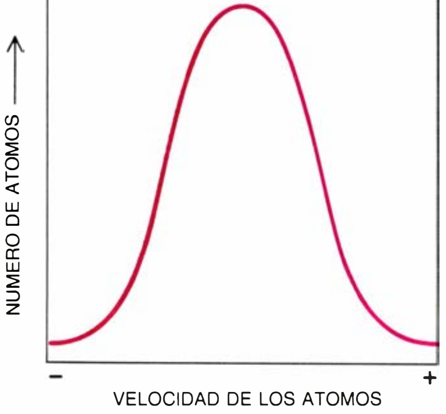
1. ENFRIAMIENTO CON LASER de átomos que se mueven con velocidades superiores a 1000 metros por segundo (3600 kilómetros por hora), que les fuerza al reposo casi absoluto. En esta figura se muestra un haz de láser que incide sobre un haz colimado de átomos de sodio. Los átomos de sodio entran desde la derecha y el haz de láser por la izquierda. La velocidad de los átomos se reduce en virtud de la presión de radiación de la luz láser; se mantienen, casi inmóviles, en la zona central de la abertura circular (que está situada al final de un solenoide, una larga bobina). Los átomos frenados se distribuyen por la "falda".

se aleja de la fuente la frecuencia aparente resulta ser menor. Incluso en ausencia de este tipo de corrimiento Doppler, como sucede en el caso de que el átomo se mueva en dirección perpendicular a la línea que le une con la fuente, existe siempre otro corrimiento de frecuencia aparente del que da cuenta la relatividad especial. (El efecto relativista débese a que un observador ve que un reloj en movimiento se retrasa en relación al suyo. Una consecuencia de este efecto se conoce con el nombre de "paradoja de los gemelos": cuando uno –que viaja en una nave espacial– regresa de su viaje ha envejecido menos que su hermano que se quedó en tierra.)

En virtud de los efectos del corrimiento Doppler, un gas cuyos átomos se muevan al azar –todos idénticos entre sí y todos con el mismo espectro– se diría constituido por un conjunto de átomos cuyos espectros estuvieran ligeramente desplazados unos de otros. Aunque la dispersión en frecuencia sea sólo del orden de la millonésima parte de la frecuencia óptica, este efecto implicará consecuencias muy importantes. Así, durante muchos años el ensanchamiento Doppler del espectro óptico del hidrógeno ocultó la existencia de un corrimiento de frecuencias pequeño, aunque significativo: el efecto Lamb. El descubrimiento del efecto Lamb (utilizando métodos no ópticos) supuso el comienzo de la teoría de la electrodinámica cuántica, considerada hoy una descripción completa de la interacción entre la radiación y la materia y paradigma de todas las modernas teorías de campos.

Otro de los efectos del movimiento que afecta a la espectroscopía es el denominado ensanchamiento por el tiempo de tránsito. Al moverse sin cesar, los átomos no permanecen en una región donde puedan ser observados durante largos períodos de tiempo. La limitación del tiempo disponible para la medición produce un ensanchamiento de los espectros. Cuanto mayor es la velocidad de los átomos, tanto menor es el tiempo de observación y mayor el ensanchamiento.





2. ATOMOS DE UN GAS; sometidos a temperatura ambiente, se mueven, céleres, a velocidades y direcciones muy distintas (*arriba*). Los átomos chocan entre sí frecuentemente y, si se mantienen en un recipiente, lo harán también con las paredes del recipiente. La distribución de velocidades de los átomos de un gas viene dada por una curva en forma de campana conocida por distribución de Maxwell-Boltzmann (*izquierda*). Lo que muestra la distribución es el número de átomos en función de la proyección de su velocidad según un eje. La anchura de la distribución aumenta con la temperatura del gas; ello dificulta las mediciones precisas. El enfriamiento de los átomos evita esos problemas.

Para superar las dificultades que el movimiento de los átomos impone a la espectroscopía se han desarrollado muchos métodos. Una espectroscopía virtualmente exenta de efectos Doppler se puede alcanzar de varias formas. En cualquier caso, todavía subsisten ciertos efectos residuales originados por las imperfecciones de los aparatos; por otra parte, estos procedimientos no resuelven los problemas que plantean el ensanchamiento debido al tiempo de tránsito y los corrimientos relativistas, que suponen una limitación para la espectroscopía que requiera una precisión de una parte en 10^{11} o más.

El enfriamiento es la forma más directa de reducir el movimiento de los átomos y minimizar dichos efectos, aumentando así la finura de las mediciones. Un método para conseguir el enfriamiento consiste en dejar que los átomos colisionen con las paredes de un recipiente frío o con los átomos fríos de otro gas. Este método de enfriamiento funciona hasta cierto punto. A bajas temperaturas, casi todos los átomos se condensan sobre las paredes del contenedor o forman moléculas o racimos con los otros átomos con que colisionan. Cuando alguna de estas cosas sucede, los átomos en cuestión dejan de estar aislados y las complejas interacciones que tienen lugar con el entorno imposibilitan las mediciones muy precisas.

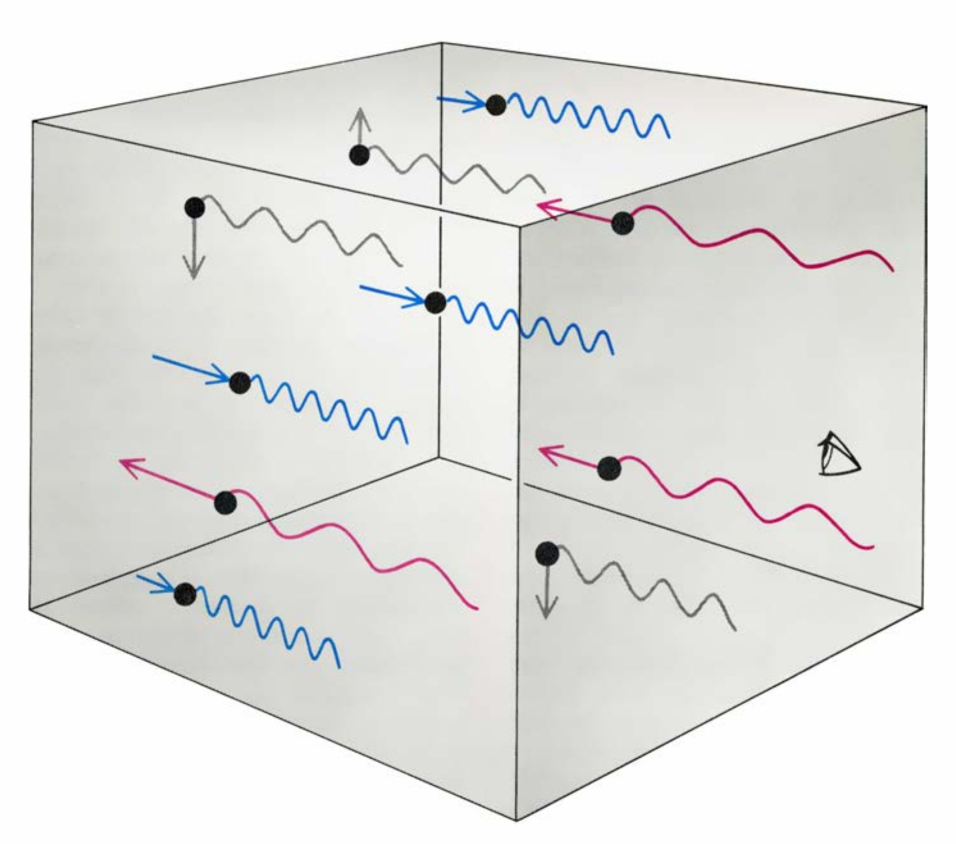
Para lograr las bajas velocidades asociadas con las bajas temperaturas sin provocar la indeseada condensación de los átomos hay que utilizar un proceso diferente: el enfriamiento con láser. En cierto sentido, la naturaleza monocromática de la luz láser, altamente organizada, le convierte en un sistema de temperatura muy baja capaz de absorber calor de los átomos que interaccionen con él. La idea del enfriamiento con láser fue propuesta independientemente en 1975 por Theodor W. Hänsch y Arthur L. Schawlow, de la Universidad de Stanford, para un gas de átomos, y por David Wineland y Hans G. Dehmelt, de la Universidad de Washington, para iones confinados.

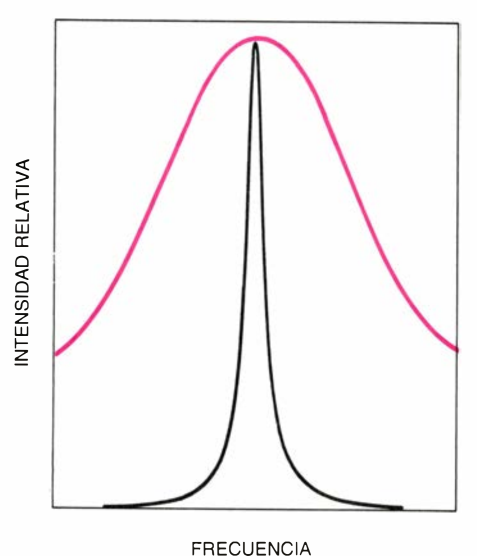
La razón de que la luz lasérica pueda utilizarse para influir en el movimiento atómico y enfriar los átomos yace en su momento, en cuya virtud empuja a los

objetos que la absorben o reflejan. El momento es una característica del movimiento que se puede transferir, pero no crear o destruir. La materia y la luz interaccionan y transfieren un momento a través del intercambio de paquetes discretos de luz denominados fotones. El número de fotones que se necesitan para enfriar los átomos es enorme. Por ejemplo, para detener por completo un solo átomo de sodio que se mueva con una velocidad de 1000 metros por segundo es necesario que choquen contra el mismo unos 30.000 fotones.

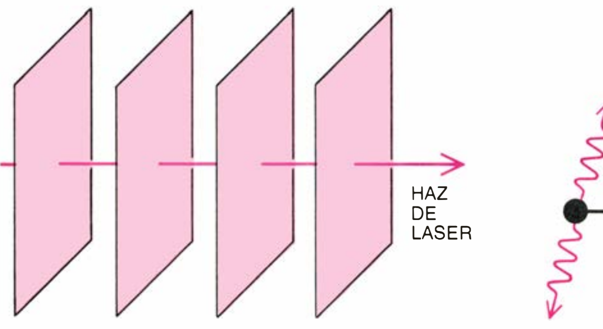
Para comprender cómo funciona el enfriamiento con láser, supongamos que un haz lasérico incida sobre un gas de átomos idénticos a temperatura ambiente. Supongamos, además, que el haz de láser posea una frecuencia particular, menor que las frecuencias intrínsecas a las que los átomos emiten y absorben radiación. En consecuencia, algunos de los átomos en su rápido movimiento al azar poseerán la velocidad y el corrimiento Doppler correspondiente para absorber eficazmente la luz; para la mayoría de los átomos la luz tendrá, sin embargo, poco efecto. En particular los átomos que se muevan hacia la fuente luminosa "percibirán" la frecuencia –desplazada por el corrimiento Doppler– más cerca de su frecuencia intrínseca, así que absorberán la luz más fácilmente. Estos átomos se frenan, pues el momento de la luz es opuesto al suyo. Por otra parte, es menos probable que los átomos que se alejen de la fuente luminosa absorban la luz, dado que en virtud del efecto Doppler "verán" la frecuencia del láser desplazada hacia un valor todavía más bajo, más alejado del necesario para que se produzca la absorción. Los átomos que se alejan de la fuente, que son acelerados cuando absorben la luz, absorben mucha menos que los átomos que se acercan a la fuente. El resultado final es que los átomos del gas se mueven con mayor lentitud.

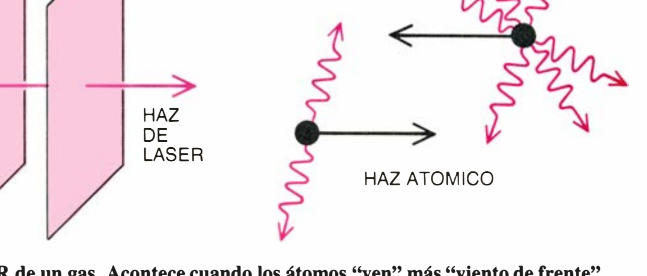
En 1978, los investigadores de la Oficina Nacional de Pesos y Medidas de Boulder y de la Universidad de Heidelberg demostraron, en sendos trabajos, el enfriamiento con láser de iones positivos confinados (átomos que han perdido uno o más electrones y poseen, por ende, una carga eléctrica neta positiva). En los experimentos llevados a cabo con iones confinados por éstos y otros grupos de trabajo se han obtenido iones enfriados hasta temperaturas de sólo unas pocas milésimas de grado por encima del cero absoluto, relojes atómicos de gran precisión y ob-





3. ATOMOS IDENTICOS, que se mueven con velocidades diferentes en un gas a temperatura ambiente, les parecen distintos a un observador por culpa del corrimiento Doppler (*arriba*). Este efecto es familiar para cualquiera que haya percibido el cambio brusco en el tono del silbato de un tren que pase ante sí. Si los átomos estuvieran en reposo, absorberían y emitirían radiación de frecuencias casi idénticas. Los átomos que se mueven hacia el observador parecen emitir a frecuencias ligeramente más altas (*azul*), debido a que las crestas y los valles de sus ondas de radiación alcanzan al observador con mayor rapidez. Los átomos que se alejan del observador parecen emitir a frecuencias ligeramente más bajas (*rojo*). Como consecuencia del corrimiento Doppler se produce un ensanchamiento del espectro de frecuencias (*izquierda*), que de no ser por eso estaría netamente definido. El espectro modificado tiene la misma forma que la distribución de Maxwell-Boltzmann que se reproduce en la figura 2.





4. ENFRIAMIENTO CON LASER de un gas. Acontece cuando los átomos "ven" más "viento de frente" que "viento de cola". Estas condiciones se alcanzan sintonizando el haz de láser a una frecuencia menor que aquella en que los átomos absorben y emiten fuertemente. Algunos de los átomos que se mueven en sentido contrario al haz de láser poseerán el corrimiento Doppler adecuado para absorber y reemitir la luz, por cuya razón quedarán frenados. Por otra parte, los átomos que se mueven en el mismo sentido que el haz de láser verán la frecuencia de la luz desplazada hacia frecuencias todavía menores y hay menos probabilidad de que absorban luz: estos átomos se acelerarán muy poco. La velocidad del conjunto de los átomos será, pues, menor.

servaciones visuales de átomos individuales.

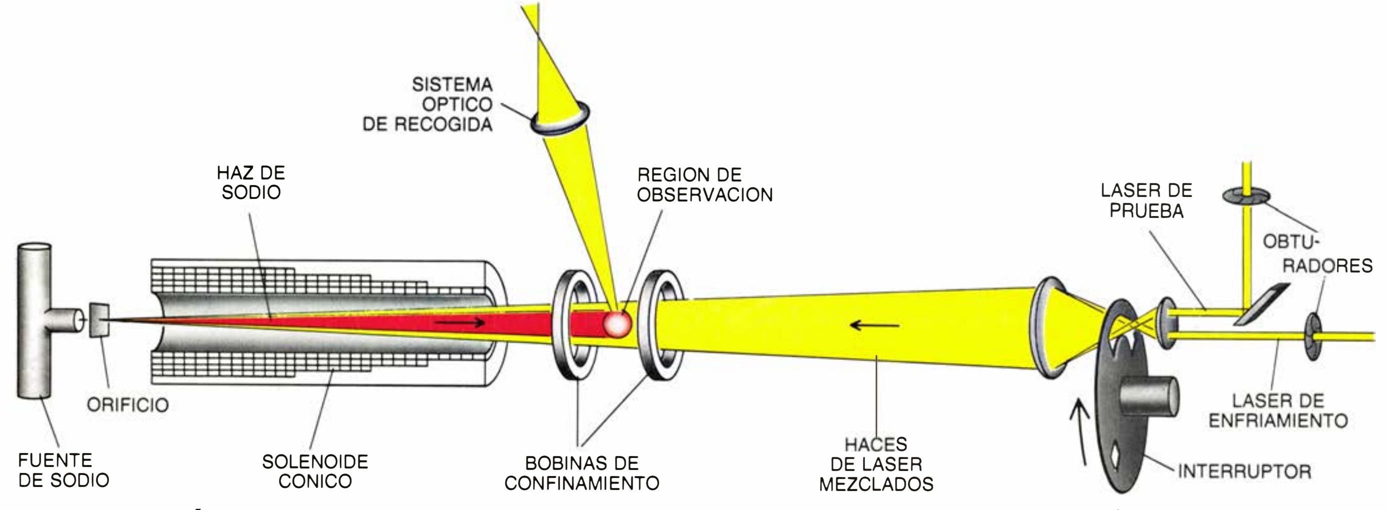
Los autores han estado trabajando en la Oficina Nacional de Pesos y Medidas de Gaithersburg, en Maryland, para generalizar la técnica del enfriamiento con láser a los átomos neutros. Una dificultad fundamental en el enfriamiento de átomos neutros consiste en que, al contrario de lo que sucede con los iones cargados eléctricamente, dichos átomos no resultan fácilmente afectados por los campos eléctricos y magnéticos. Aunque los iones que se mantienen a temperatura ambiente, o aún mayor, quedan atrapados fácilmente en tales campos, los átomos neutros deben enfriarse primero hasta temperaturas del orden de un grado Kelvin (−272 grados Celsius), o inferiores, antes de que puedan ser atrapados. A lo largo de estos últimos años, nuestro grupo y otros del Instituto de Espectroscopía de Moscú, la Oficina Nacional de Pesos y Medidas de Boulder, los laboratorios Bell de la AT & T, la Universidad de Colorado en Boulder, la de Bonn, la Escuela Normal Superior de París, la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook y el Instituto de Tecnología de Massachusetts, han desarrollado distintos métodos para enfriar átomos neutros con haces de luz lasérica.

Todos estos métodos utilizan átomos neutros que se mueven con libertad, en general átomos de sodio en forma de un haz. El haz de sodio se obtiene calentando un horno con sodio metálico a 450 grados C. El metal se evapora y los átomos salen del horno a través de un pequeño orificio formando un haz divergente; a continuación, se apantalla todo el haz, salvo una pequeña fracción que pasa por otro orificio a unos 10 centímetros del primero. En nuestro aparato, el láser incide directamente sobre el haz de sodio. De este modo, todos los átomos pueden interaccionar con la luz el máximo tiempo posible.

Cuando un átomo absorbe luz salta a un estado excitado. El átomo puede volver al estado fundamental –o no excitado– mediante dos procesos: emisión estimulada o emisión espontánea. Si la emisión es estimulada (inducida por la luz del láser), el fotón emitido se mueve en la misma dirección que el fotón absorbido y no cambia el momento del átomo. Ahora bien, si la emisión es espontánea, los fotones se emiten al azar, según direcciones simétricamente distribuidas. Las absorciones consecutivas y seguidas por emisiones espontáneas producen una deceleración neta de los átomos en la dirección del haz de láser. La máxima deceleración que un átomo de sodio puede experimentar en el enfriamiento con láser es del orden de un millón de metros por segundo al cuadrado, es decir, un valor 100.000 veces mayor que la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre. Bajo esta enorme deceleración, un átomo de sodio que se mueva con una velocidad de 1000 metros por segundo se detendrá en un milisegundo tras recorrer una distancia de 50 centímetros.

Conforme la velocidad de los átomos disminuye, aunque sólo sea unos pocos metros por segundo, sus corrimientos Doppler cambian lo suficiente como para impedir la absorción de luz. Al cabo de poco tiempo, los átomos dejarán de ser decelerados y continuarán su recorrido sin ser dificultados por el haz de láser. Una forma de contrarrestar este efecto contraproducente consiste en aumentar progresivamente la frecuencia del láser, a medida que la velocidad de los átomos va disminuyendo, con el fin de que éstos sigan absorbiendo la radiación. V. S. Letokhov y sus colaboradores, del Instituto de Espectroscopía de Moscú, propusieron este método en 1976, y John Prodan y uno de los autores (Phillips) lo utilizaron en 1983 en nuestro laboratorio de Gaithersburg. Desde entonces, John L. Hall y sus colaboradores de la Oficina Nacional de Pesos y Medidas en Boulder y otros grupos de trabajo han empleado este método con éxito.

Sin embargo, a lo largo de la mayor parte de nuestro trabajo hemos hecho uso de una técnica diferente para superar la complicación producida por el cambio de los corrimientos Doppler. Mantenemos constante la frecuencia del haz de láser y manipulamos los niveles de energía de los átomos de forma que éstos continúen absorbiendo el haz. Lo que se consigue obligando a los átomos a atravesar un campo magnético cuya intensidad varía a lo largo de su trayectoria. En virtud de un fenómeno conocido por efecto Zeeman, los niveles energéticos de un átomo cambian de una forma perfectamente determinada cuando el átomo en cuestión se encuentra en un campo magnético. Nuestro aparato ha sido diseñado de suerte que el campo magnético sea fuerte en el punto por donde pe-

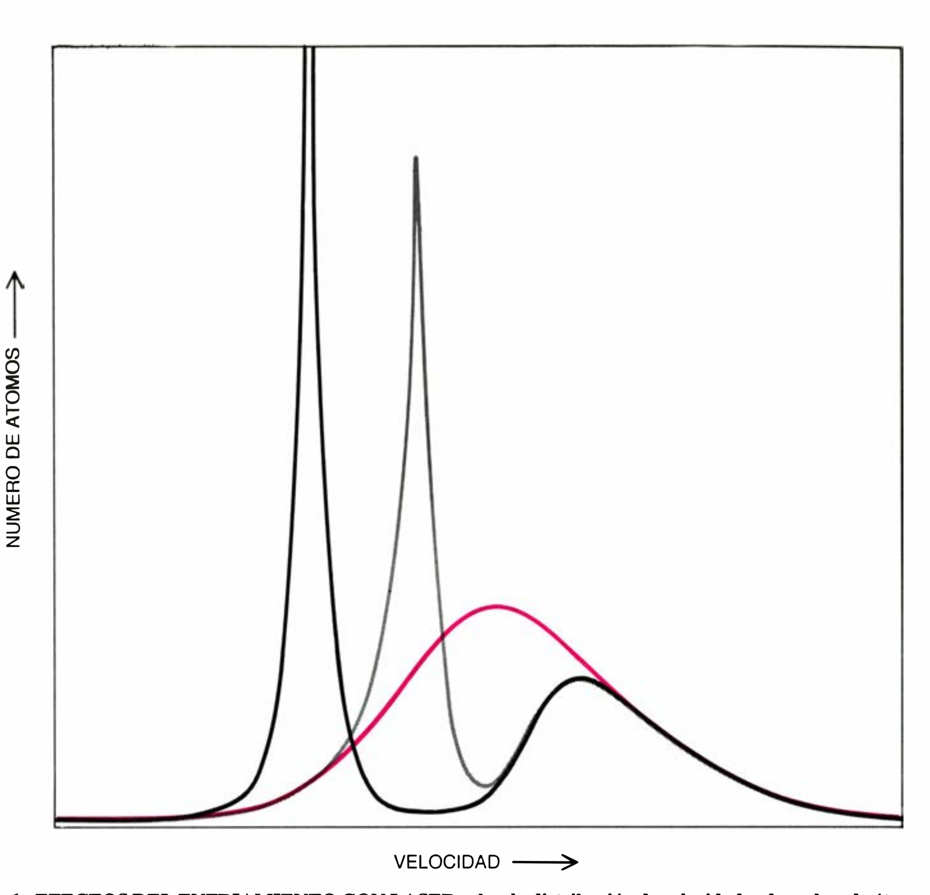


5. APARATO DISEÑADO POR LOS AUTORES para el enfriamiento de un haz atómico y el confinamiento magnético de átomos neutros. Lo emplean para reducir la velocidad de un haz de átomos de sodio que se mueve a lo largo de un solenoide haciendo incidir un haz de láser sobre el haz atómico. La medición de la distribución de velocidades de los átomos y el estudio de los cambios que provoca el láser se llevan a cabo recogiendo y detectando la fluorescencia que producen los átomos al ser excitados por un segundo láser de prueba, muy débil, que se propaga en una dirección casi paralela al haz atómico. La absorción de esta radiación, y con ella la intensidad de dicha fluorescencia, dependerá de la velocidad de los átomos en virtud del corrimiento Doppler del haz de prueba. La dependencia de la fluorescencia con la frecuencia del láser de prueba refleja la distribución de velocidades de los átomos. Los átomos muy lentos pueden quedar atrapados por el campo magnético engendrado por el par de "bobinas de confinamiento". Los atrapados se mueven como si su temperatura fuera de 10 milikelvin, ligeramente por encima del cero absoluto. Interruptores y obturadores sirven para conectar y desconectar los haces de láser a su tiempo.

netran los átomos y que su intensidad vaya disminuyendo gradualmente a medida que aumenta la distancia desde ese punto. Cuando un átomo atraviesa este campo magnético, sus niveles energéticos cambian continuamente, con lo que se contrarresta la disminución de los corrimientos Doppler. En virtud de ello, el átomo sigue absorbiendo luz del haz de láser y su velocidad disminuye.

Utilizando esta técnica hemos conseguido enfriar un haz de átomos hasta temperaturas inferiores a 100 milikelvin y reducir la velocidad media de estos átomos hasta cero. De hecho hemos obtenido un gas frío de átomos casi inmóviles.

En contraste, el proceso de enfriamiento con láser de un gas de átomos difiere bastante del enfriamiento con láser de un haz de átomos. La razón estriba en que todos los átomos de un haz se mueven aproximadamente en la misma dirección, de modo que para reducir su movimiento resulta suficiente un solo haz de láser. Los átomos libres de un gas, por el contrario, se mueven en todas direcciones y, así, su enfriamiento requiere la utilización de varios haces de láser. Steven Chu y sus colaboradores, de los laboratorios Bell de la AT & T, han utilizado haces de láser múltiples para producir un enfriamiento adicional de la muestra, obtenida tras enfriar previamente un haz de átomos con láser, hasta alcanzar temperaturas inferiores a un milikelvin. Los átomos que se encuentran en la intersección de los haces múltiples experimentan una fuerza de frenado en cualquier dirección en que se muevan; se dice entonces que forman una "melaza óptica".



6. EFECTOS DEL ENFRIAMIENTO CON LASER sobre la distribución de velocidades de un haz de átomos. Son considerables. Sin enfriamiento con láser, la distribución de velocidades es ancha (*curva de color*). Cuando el haz atómico interacciona con un haz de láser y atraviesa un solenoide largo que produce un campo magnético uniforme, la distribución de velocidades se modifica: algunos átomos en torno al centro de la distribución, frenados, se concentran en un máximo relativamente estrecho en el que todos los átomos presentan casi la misma velocidad (*curva gris*). Ajustando la intensidad del campo magnético de forma tal que dicho campo resulte ser fuerte en el punto por el que los átomos entran y que su intensidad disminuya gradualmente a medida que nos alejamos de dicho punto, se consigue que la velocidad de un mayor número de átomos sea menor y esté concentrada en una distribución de velocidades más estrecha (*curva negra*). Importa distinguir entre deceleración, o reducción de la velocidad, y enfriamiento, que es la reducción de la dispersión de las velocidades. El método utilizado por los autores de este artículo produce uno y otro efecto.

Una de las consecuencias más interesantes del enfriamiento de átomos neutros consiste en la posibilidad de almacenarlos en "trampas atómicas", singulares recipientes cuyas "paredes" son campos electromagnéticos en vez de sustancias materiales. Hace ya tiempo que se había logrado atrapar electrones, iones y otras partículas cargadas, dado que los campos eléctricos y magnéticos intensos pueden influir considerablemente en su movimiento [véase "El electrón aislado", por Philip Ekstrom y David Wineland; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1980]. Sin embargo, los campos eléctricos y magnéticos difícilmente pueden alterar los átomos neutros, ya que éstos carecen de carga eléctrica neta.

A lo largo de los últimos 25 o 30 años se han propuesto diversas trampas para átomos neutros. En la década de 1950 Wolfgang Paul, de la Universidad de Bonn, sugirió que sería posible la utilización de trampas magnéticas. En 1970 Letokhov e independientemente Arthur Ashkin, de los laboratorios Bell, propusieron otra alternativa: las trampas de láser. En 1978, Paul y sus colaboradores culminaron con éxito sus intentos de confinar neutrones en un anillo de almacenamiento magnético. Su experiencia constituye una piedra miliar, pues por primera vez las partículas neutras eran confinadas electromagnéticamente. Su trabajo les permitió hacer nuevas mediciones de la vida media de los neutrones. (Al cabo de unos 15 minutos un neutrón aislado se desintegra en un protón, un electrón y una partícula llamada neutrino.)

Nuestra trampa para átomos neutros se basa en los mismos principios físicos que el anillo de almacenamiento de neutrones usado por Paul. Aunque un átomo neutro no posee una carga eléctrica neta, puede tener un pequeño momento magnético dipolar: el átomo se comporta como si fuera un pequeño imán. Ahora bien, cuando un imán se introduce en un campo magnético no homogéneo, la intensidad del campo en un polo difiere de la intensidad en el otro polo, de modo que se ejerce una fuerza sobre el imán. Si el imán es un átomo, la fuerza en cuestión es bastante pequeña; a pesar de todo, se trata de una cantidad observable. Los efectos de un campo magnético no homogéneo sobre un átomo neutro fueron observados en 1924 por Otto Stern y Walther Gerlach. El experimento de Stern y Gerlach demostró que un átomo de plata se comportaba como un imán cuyo eje sólo podía tener dos orientaciones respecto al campo magnético. (Desde luego, un imán ordinario podía adoptar un conjunto continuo de posibles orientaciones.)

En nuestros experimentos, los átomos de sodio presentan dos clases de orientaciones: de acuerdo con la primera, los átomos son repelidos por los campos magnéticos intensos; en la segunda, los átomos son atraídos por dichos campos. En nuestro proceso de enfriamiento con láser bombeamos óp-

ticamente todos los átomos hacia la orientación repelida por los campos magnéticos intensos. Para atrapar a los átomos habíamos construido un par de bobinas por las que circulaba una corriente eléctrica, dispuestas de tal forma que sus campos magnéticos fueran opuestos. En el punto situado a la misma distancia de ambas, el campo magnético es nulo y la intensidad del campo aumenta en cualquier dirección a partir de este punto; en consecuencia, los átomos son empujados hacia la zona central. Este tipo de confinamiento era uno de los primeros que sugirió Paul; se han propuesto otros métodos similares para el confinamiento de neutrones ultrafríos [véase "Neutrones ultrafríos", por R. Golub, W. Mampe, J. M. Pendlebury y P. Ageron; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1979].

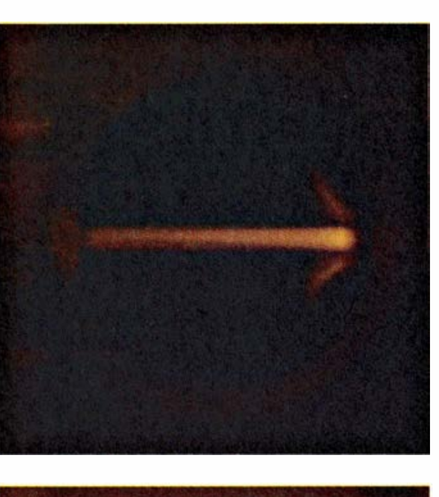
En nuestros experimentos de confinamiento reducimos la velocidad de los átomos enfriándolos con un láser. Dejamos, luego, que los átomos entren en el espacio situado entre las dos bobinas conductoras y anulamos su velocidad mediante un breve pulso luminoso, una técnica que desarrollamos en nuestro laboratorio con Prodan, Alan Migdall, Jean Dalibard e Ivan So. El movimiento residual de los átomos de la muestra es tan pequeño –se mueven con velocidades de escasos metros por segundo– que una vez han entrado en la región situada entre las bobinas permanecen en ella el tiempo suficiente para conectar la corriente eléctrica que alimenta la trampa magnética.

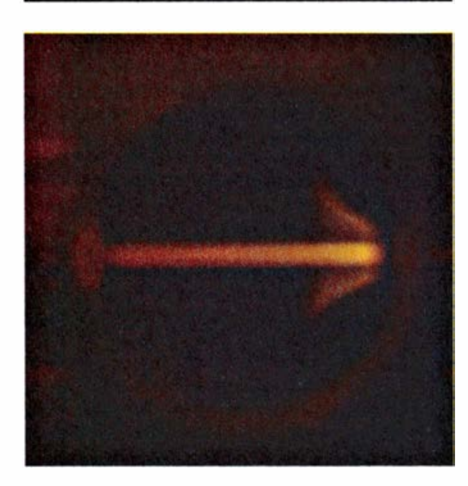
Los ensayos que llevamos a cabo con Thomas H. Bergeman, de Stony Brook, y los colaboradores citados anteriormente han demostrado la eficacia de nuestra trampa para confinar los átomos de la muestra. Las pérdidas de átomos débense, en su mayoría, a eventuales colisiones con las moléculas gaseosas residuales. Por ser muy pequeña la fuerza magnética que mantiene a los átomos en la zona de confinamiento, se dice que la trampa es "débil". Un átomo que se mantenga en esta región es como un "pato sentado" sometido al golpe de una molécula a temperatura ambiente. Aunque el aparato funciona en el vacío, todavía queda un número suficiente de átomos como para que se produzcan algunas colisiones destructoras que impartan una energía suficiente para expulsar a los átomos de la trampa débil.

Un átomo de sodio permanecerá en la región de confinamiento siempre que su velocidad no supere los 3,5 metros por segundo, lo cual corresponde a una energía que expresada en términos de temperatura es del orden de 17 milikelvin. Hemos conseguido confinar decenas de miles de átomos con esta energía o incluso con energías inferiores durante tiempos superiores a un segundo en una región de 20 centímetros cúbicos, un volumen aproximadamente igual al de una pelota de golf. La limitación en el tiempo de confinamiento se debe únicamente a las colisiones que se producen con los átomos residuales existentes en el vacío. En última instancia, las limitaciones en el tiempo de confinamiento en un vacío perfecto estarían originadas por la tasa con que los átomos sufren una transición cuántica desde un estado en el cual son repelidos por los campos magnéticos intensos hasta un estado en el que son repelidos por campos magnéticos débiles. Los cálculos realizados al respecto demuestran que la mayoría de los átomos continuarían confinados al cabo de varias horas.

Otro método para confinar átomos neutros se apoya exclusivamente en el empleo de haces de láser y en las fuerzas que dichos haces ejercen. En una de las versiones de esta vía de confinamiento las fuerzas no proceden de la mera transferencia de momento que se produce cuando un átomo absorbe un fotón y emite otro espontáneamente, como sucede en el proceso de enfriamiento con láser. El haz de láser, una parte del cual consiste en un campo magnético oscilante, crea cambios dinámicos en los átomos que dan lugar a una fuerza si el campo del láser no es uniforme (al igual que sucede con el momento magnético en un campo magnético no uniforme). Por convención, esta fuerza recibe el apelativo de dipolar o gradiente.

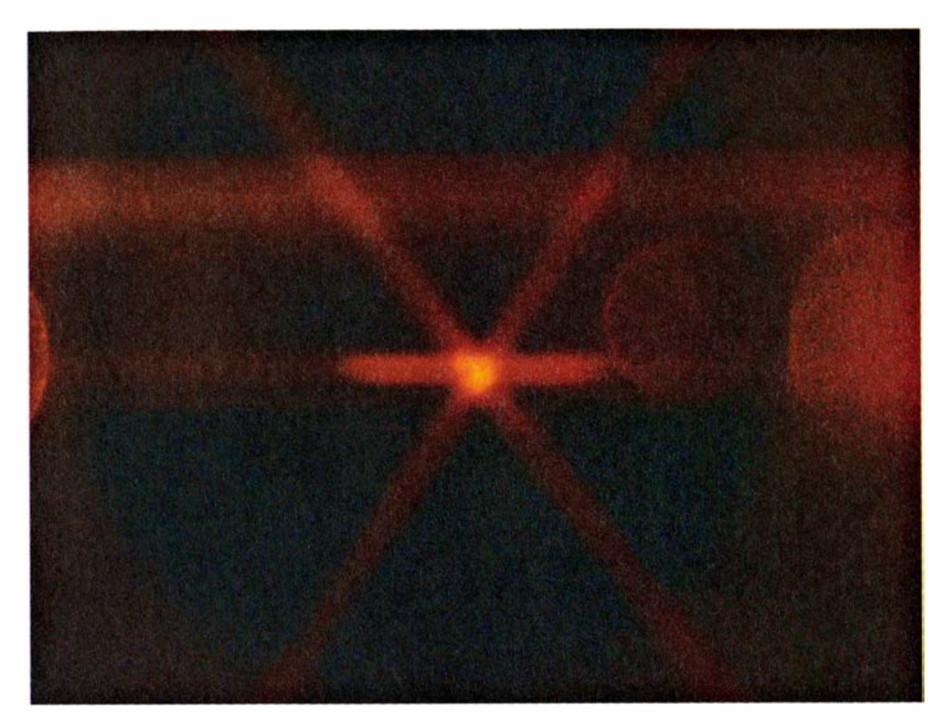
Tal como Letokhov sugirió en 1968, la fuerza dipolar puede emplearse para confinar átomos. En 1978, Ashkin propuso una trampa de láser particularmente sencilla y elegante, que se ha utilizado ya con éxito. El método de Ashkin consiste en enfocar un haz de láser sobre un pequeño punto. La focalización produce un campo lasérico más intenso en el centro del foco; el campo disminuye conforme aumenta la distancia al foco, en cualquier dirección.







7. HAZ DE ATOMOS DE SODIO enfriado con láser tal como sale del solenoide en el aparato de los autores. El haz atómico se mueve de derecha a izquierda; el haz de láser se mueve de izquierda a derecha. A medida que la frecuencia del láser disminuye, la posición en la que los átomos de sodio se detienen se desplaza hacia la izquierda y se ve una falda mayor (*de izquierda a derecha y de arriba abajo*). El haz se observa a través de una abertura circular situada en uno de los lados del aparato. (Fotografías cedidas por W. D. Phillips.)



8. LAS MELAZAS OPTICAS producidas en el laboratorio de los autores por Phillip Gould y Paul Lett se ofrecen en forma de un punto brillante en la intersección de seis haces de láser; éstos son muy eficaces para amortiguar y detener cualquier movimiento atómico en la región de intersección; parecería que los átomos estuvieran inmersos en una melaza. Los átomos de sodio enfriados con láser entran en la melaza por la izquierda y quedan atrapados en ella. Un haz de luz láser de enfriamiento ilumina algunos átomos.

Cuando la frecuencia del láser se ajusta a un valor por debajo de la frecuencia en que la absorción de los átomos se hace importante, la fuerza dipolar empuja a éstos hacia la región donde el campo es más intenso. Como es natural, la presión de radiación ordinaria que resulta de la transferencia del momento tiende a empujar a los átomos a lo largo de la dirección del haz de láser, pero la fuerza dipolar puede superar este efecto contraproducente si el haz de láser está fuertemente focalizado, es intenso y se halla sintonizado a una frecuencia alejada de la frecuencia de absorción de los átomos. En cualquier caso, la profundidad de un sistema de confinamiento con láser es muy pequeña y el método de Ashkin, así como el de confinamiento magnético, tuvo que esperar el éxito de las técnicas de enfriamiento con láser antes de que pudiera ponerse en práctica.

El sistema de confinamiento con láser presenta, además, una complicación adicional. Al revés de lo que ocurre con las trampas magnéticas, este campo de confinamiento tiende a calentar los átomos de forma tal que acaban por "evaporarse". Para resolver el problema se continúa enfriando los átomos durante su confinamiento. Procedimiento que exige una transición rápida entre el enfriamiento y el confinamiento, conectando y desconectando varios haces de láser; este método fue propuesto por Dalibard, Serge Reynaud y Claude Cohen-Tannoudji, de la Escuela Normal Superior de París. Combinándolas con un enfriamiento tridimensional en melazas ópticas, todas estas técnicas fueron utilizadas por Chu y sus colaboradores para obtener un sistema de confinamiento de átomos de sodio en el que los átomos se mantienen atrapados en un volumen de 10^{-7} centímetros cúbicos a temperaturas inferiores al milikelvin.

Más recientemente, un grupo de investigadores del laboratorio de Cohen-Tannoudji demostraron que un haz atómico podía enfriarse por medio de fuerzas dipolares. Este método resulta muy prometedor, pues la intensidad de la fuerza dipolar permite un enfriamiento mucho más rápido que el enfriamiento ordinario con láser.

Aunque el futuro del enfriamiento y confinamiento de átomos neutros e iones con láser es difícil de predecir, parece evidente que estas técnicas se encuentran ya sólidamente establecidas en áreas prioritarias de la investigación. El movimiento térmico, que ha supuesto una verdadera pesadilla para los investigadores durante mucho tiempo, se bate en retirada. En la actualidad es fácil obtener haces atómicos y gases a temperaturas de milikelvin; quiza se logren pronto temperaturas de microkelvin y menores incluso. Una nueva era en las mediciones atómicas se encuentra al alcance de la mano.

Ciencia y sociedad

Supersede

La decisión del presidente Reagan de brindar apoyo a la construcción de lo que será el mayor acelerador de partículas del mundo ha lanzado a una veintena de estados norteamericanos a preparar las candidaturas que competirán por la designación del lugar que deba acogerlo. Una comisión técnica elaborará antes de final de año una breve relación de finalistas y, en enero de 1989, se elegirá el ganador. Cualquiera que sea el nivel de su conocimiento de los secretos del cosmos, los funcionarios estatales de desarrollo industrial saben bien que el supercolisionador superconductor (SSC) aportará jugosos beneficios económicos.

Su propio nombre, supercolisionador superconductor, denota que en el ingenio se emplearán imanes superconductores y que es de gran tamaño: se instalará en un túnel de más de 80 kilómetros de circunferencia. Las proporciones del SSC se explican porque ni siquiera los imanes superconductores tienen potencia suficiente para impedir que los protones, a los que el SSC confiere una elevadísima cantidad de movimiento, escapen en curvas más ceñidas que ésa. Los protones, acelerados en sentidos contrarios, colisionarán entre sí con una energía total de 40 TeV (billones de electronvolt), 20 veces más que la energía alcanzada en el Tevatrón del Fermilab.

El túnel deberá situarse al menos a 6 metros bajo tierra, por lo que, y ello constituye uno de los requisitos principales, el terreno deberá presentar suficiente estabilidad geológica. En ese contexto, recordemos, hubo de retrasarse durante meses la construcción de un acelerador del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra: el túnel que perfora las montañas del Jura tropezó con una falla que lo inundó de agua hasta medio metro de altura. También se consideran importantes los factores de carácter social; el Departamento norteamericano de Energía ha recabado de los aspirantes que informen sobre ciertos datos que miden el nivel de la enseñanza impartida en sus zonas. Es probable que a quienes hayan de trabajar en las instalaciones del acelerador y tengan hijos les interese conocer bien la calidad de las escuelas del lugar.

En opinión de los físicos de altas energías, las nuevas partículas que generen los protones en su colisión a altísimas energías informarán sobre las relaciones mutuas que presentan las cuatro fuerzas naturales conocidas [véase "El supercolisionador superconductor", por J. David Jackson, Maury Tigner y Stanley Wojcicki; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1986].

La oposición al SSC se centra en su coste, valorado actualmente en unos 4400 millones de dólares de 1988. Sostienen los opositores que el proyecto obligará a desviar fondos de otras áreas científicas que probablemente aportarían un beneficio económico más inmediato. George C. Pimental, de la Universidad de California en Berkeley, quien, en 1985, realizó para la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos un estudio de la situación de la química académica, plantea una cuestión distinta. "Lo más probable, afirma, es que el SSC no incida apreciablemente sobre la vida del ciudadano medio".

El secretario de energía John S. Herrington replica a los críticos que el SSC se construirá con dinero nuevo y, por consiguiente, no afectará a otros proyectos de investigación básica. Arno A. Penzias, vicepresidente de los laboratorios AT&T Bell, premio Nobel y declarado opositor al SSC, afirma que ello será así en el caso de que la administración norteamericana no incluya en el futuro los costes del SSC en la partida de otros proyectos de investigación fundamental. Esta responde en su defensa, y para demostrar que no se resentirán otras investigaciones, que en cinco años duplicará el presupuesto de 1600 millones de dólares de la Fundación Nacional de la Ciencia.

Los estados que parecen ocupar la cabecera de las candidaturas son Illinois, California, Texas, Washington, Colorado, Ohio y Utah. Illinois, sede del Fermilab, muestra un especial interés en llevarse el acelerador a casa y para ello afirma estar dispuesto a invertir más de siete millones de dólares. Parte con ventaja: el Tevatrón del Fermilab, situado cerca de Chicago, podría aprovecharse para inyectar protones al anillo principal del SSC. Dos estados, cuando menos, han anunciado estar dispuestos a compensar cualquier ventaja que pueda ofrecer la posesión del Tevatrón: ofrecen hasta 500 millones de dólares a cambio.

La construcción del SSC supondrá un gasto anual de 600 millones de dólares. Miembros del Congreso norteamericano creen que, pese a su popularidad, el proyecto se someterá a un seguimiento detallado en el Capitolio. Los modestos 35 millones de dólares que el Departamento de Energía pide que se destinen al SSC en 1988 se "reprogramarán" de otros proyectos; según parece, la estrategia política consiste en interesar ahora al mayor número de estados posible y pedir la contribución financiera principal en 1989, cuando se haya instalado una nueva administración. La empresa podría beneficiarse del diseño de modos innovadores de recabar fondos; algunos países, entre ellos Japón, han expresado ya informalmente su interés.

Mide menos

Plutón, el más exterior de los planetas del sistema solar que se conoce, se ha resistido desde siempre a la observación. Su distancia (de unos 4500 millones de kilómetros en su máxima aproximación a la Tierra) y la escasa luz que refleja han impuesto un límite a lo que se conoce del planeta. Descubierto en pleno siglo XX (en 1930), hasta 50 años después no se supo que poseía una luna. Su tamaño, estimado recientemente, se cifra en unos 4000 kilómetros de diámetro.

No sorprenderá, por consiguiente, que cuando las posiciones de Plutón, su satélite y la Tierra resultan especialmente adecuadas para obtener información sobre el sistema plutoniano, y ello sólo ocurre dos veces cada 248 años (que es lo que dura la órbita del planeta), los astrónomos aprovechen tan propicia ocasión. Así lo han hecho dos científicos alemanes, que han efectuado mediciones telescópicas del tamaño del planeta y del de su satélite. De acuerdo con sus resultados, Plutón sólo mide la mitad de lo que se creía.

Desde el descubrimiento de Caronte, la luna de Plutón, en 1978, los astrónomos sabían que podría aprovecharse el movimiento orbital del satélite para calcular las dimensiones de los dos cuerpos que constituyen el sistema

plutónico: observando la variación del brillo del sistema cuando Caronte pasara por delante y por detrás de Plutón (eclipse de Plutón y ocultamiento de Caronte, respectivamente) se estimarían los diámetros y masas de ambos cuerpos. Sólo se oponía a la realización de las mediciones un problema: desde la perspectiva de un observador situado en la Tierra, Plutón y Caronte no se alinearían según exigían esas mediciones hasta mediados de la década de 1980. En realidad, la configuración correcta se dio en 1986; en esas fechas, Manfred Pakull y Klaus Reinsch, de la Universidad Politécnica de Berlín, efectuaron, desde el Observatorio Europeo Meridional, situado en La Silla, Chile, las oportunas mediciones de la intensidad luminosa.

Sus observaciones y cálculos brindan las estimaciones más precisas del tamaño de Plutón y de Caronte logradas hasta la fecha. Informan los atrónomos alemanes que el diámetro de Plutón es de 2200 kilómetros y, el de Caronte, de 1160 kilómetros. Suponiendo que el planeta y su satélite estén formados por el mismo tipo de material —probablemente una mezcla de roca y gases helados— Caronte representaría hasta el 13 por ciento de la masa total del sistema. Por el contrario, la luna terrestre mide unos 3470 kilómetros de diámetro y representa únicamente el uno por ciento de la masa global del sistema Tierra-Luna.

¿Diagnóstico precoz de la enfermedad de Alzheimer?

Se ha localizado en el cromosoma 21 —el asociado al síndrome de Down, o mongolismo, una de las principales causas de retraso mental— un defecto genético implicado en un tipo de enfermedad de Alzheimer, cuando menos.

Considerada a menudo una enfermedad de la vejez, la de Alzheimer ataca sin embargo a los miembros de ciertas familias cuando se encuentran aún en su quinta década de vida, o incluso antes. Dos líneas de investigación distintas apuntan, en *Science*, la existencia de un posible trastorno subyacente a la variedad familiar de la enfermedad de Alzheimer, que podría explicar asimismo los casos (la gran mayoría) en los que no se ha demostrado su carácter hereditario.

Uno de los enfoques consistía en la elaboración de mapas genéticos. Científicos de Francia, Italia y Alemania Occidental colaboraron con Peter H. St. George-Hyslop y James F. Gusella, de la Facultad de Medicina de Harvard, y otros en la reunión de cuatro árboles genealógicos detallados de la variedad familiar de la enfermedad de Alzheimer, uno de los cuales cubría ocho generaciones. Analizando el patrón hereditario del ADN en los miembros supervivientes de las familias, por medio de marcadores que se unen a puntos cromosómicos conocidos, los autores lograron definir una estrecha banda del cromosoma 21 donde probablemente se alojaba el error genético causante de la enfermedad. Las víctimas del síndrome de Down presentan una copia supernumeraria del cromosoma 21; los afectos de mongolismo que llegan a cierta edad desarrollan a menudo un estado parecido al de la enfermedad de Alzheimer. Además de los síntomas clínicos en que coinciden, ambos grupos presentan depósitos cerebrales anormales de una proteína poco usual, la denominada beta amiloide.

La segunda línea de investigación atacó el problema en una dirección distinta. Los grupos encabezados por Dmitry Goldgaber, del Instituto Nacional estadounidense de Trastornos Neurológicos, de la Comunicación y Apoplejía, y Rudolph E. Tanzi y Rachael Neve, de la Facultad de Medicina de Harvard, sintetizaron breves cadenas de pseudo-ADN diseñado para enlazarse al gen que determina la proteína beta amiloide. Tras superar diversos obstáculos, ambos grupos encontraron que las versiones finales de sus sondas se unían al cromosoma 21. En otros términos, el gen se encontraba en las proximidades del defecto que habían cartografiado St. George-Hyslop y Gusella, si bien no necesariamente coincidente con el mismo. Nicholas Robakis, del Instituto de Investigación Básica sobre Retraso Mental, del estado de Nueva York, informó casi simultáneamente en *Lancet* de la obtención de resultados similares.

Según parece, la proteína beta amiloide deriva de otra, mayor, que se localiza en muchos tejidos corporales. Puesto que la evolución ha conservado con gran fidelidad porciones del precursor, debe desempeñar algún papel importante; en un trabajo aparecido en un número reciente de *Nature* se sugiere que podría tratarse de un receptor celular superficial. El defecto que provoca la deposición de la proteína beta amiloide en forma de placas cerebrales características en pacientes de la enfermedad de Alzheimer y algunos afectos del síndrome de Down podría localizarse en el gen que determina la propia proteína, o en algún otro que incida en ella. Así las cosas, está a punto de emprenderse un gran esfuerzo investigador encaminado a dilucidar cuál de esas opciones es la correcta.

Desgraciadamente, esa nueva información no ofrece, en sí misma, esperanzas de cura o lenitivo de la enfermedad de Alzheimer o el síndrome de Down en un futuro inmediato. Sí se prevé, en cambio, la obtención de una sonda genética con la que puedan identificarse los individuos, pertenecientes a familias afectadas, que probablemente vayan a desarrollar la enfermedad de Alzheimer. Gusella cree que, en tres o cinco años, podría disponerse del ensayo. El que ese tipo de prueba logre predecir la enfermedad en personas no pertenecientes a familias reconocidamente afectadas dependerá de que se descubra que, bajo esos casos, subyace también alguna sutil predisposición genética.

Datos fraudulentos

Cual si se tratara de maestros de la pintura italiana, flamenca u holandesa, los investigadores de prestigio de las principales instituciones suelen incluir sus nombres en trabajos en los que no han colaborado directamente. La práctica quizá resulte justificable, pero conlleva cierto riesgo. En el caso del pintor, una obra menor puede degradar su futura valoración; en el del científico, puede implicarle en casos de fraude. Pese a carecerse de la menor sospecha de que los investigadores de importancia que se han visto envueltos en esas situaciones hayan participado conscientemente en el engaño, tales incidentes plantean graves cuestiones acerca del entorno que rodea a la investigación de punta.

En la Universidad de California, un joven y prometedor investigador publicó 68 trabajos que contenían datos inventados. Uno de los investigadores jefes del Instituto Oncológico Dana Farber, de Boston, retiró dos trabajos que anunciaban el descubrimiento de una interleucina al comprobar que uno de los coautores había falsificado los datos. La confianza en los becarios, colaboradores y colegas "constituye el corazón de la mejor ciencia", afirma Gerald R. Fink, del Instituto Whitehead, adscrito al Instituto de Tecnología de Massachusetts. La falsificación o la representación intencionadamente errónea de los datos constituye un flagrante

abuso de esa confianza. ¿Por qué se miente, entonces?

Efraim Racker, de la Universidad de Cornell, ha reconocido una pauta en los casos conocidos de fraude. Hace unos pocos años, en su propio laboratorio, un investigador sustituyó fósforo por iodo en unos experimentos diseñados para esclarecer la diferencia entre células malignas y normales. Racker juzga que los individuos que cometen fraude son suficientemente inteligentes para efectuar descubrimientos importantes sin necesidad de engañar. Cuando deciden falsificar los datos, saben que tarde o temprano se les descubrirá, puesto que sus experimentos se someterán a un minucioso análisis en las pertinentes duplicaciones. La astucia con que esos individuos velan las pistas puede entorpecer la detección de sus engaños; sin embargo, señala Philip A. Sharp, del MIT, "resulta muy difícil inventarse un gran volumen de datos" y cualquier investigador "que siga el experimento de cerca" acabará detectando la mayoría de las trampas.

En todo caso, ¿cuán "de cerca"? Según J. Stephen Shaw, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, un jefe de grupo de investigación debería examinar cuando menos la mayor parte del total de datos brutos obtenidos por su equipo y elegir la fracción apta para publicarse. Y Timothy A. Springer, de Dana Farber, opina que debe animarse el debate entre los diversos cargos de un mismo laboratorio.

Tres de los principales factores que limitan el examen crítico de los datos por parte de los jefes de investigación son la desproporcionada magnitud de los laboratorios, la estratificación de la estructura supervisora y las presiones que se ejercen para que se publiquen trabajos. Esos mismos factores tienden a aumentar la tensión sufrida por los investigadores jóvenes.

No hay tamaño de laboratorio que pueda considerarse el ideal; muchos investigadores consideran, empero, que de 20 a 25 alumnos de doctorado es el máximo que puede supervisar una sola persona. En mucho departamentos suele haber investigadores de nivel intermedio entre el jefe de laboratorio y los alumnos de doctorado, que son quienes generan los datos; según Robert A. Weinberg, del Instituto Whitehead, ello constituye "una invitación al desastre", puesto que reduce la participación del investigador jefe en la recolección de datos. Kenneth L. Brigham, de la Facultad de Medicina de la Universidad Vandebilt, mantiene, por el contrario, que ese nivel intermedio puede resultar ventajoso, pues añade un control más a la coherencia de los datos.

La presión que insta a publicar puede infiltrarse en cualquier laboratorio. Daniel Nathans, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, cree que "una de las responsabilidades del jefe de laboratorio es proteger a los jóvenes de la presión a que publiquen y favorecer una atmósfera en la que el trabajo creativo domine el tono del laboratorio".

En ocasiones, debería llamar la atención la cifra de trabajos publicados. En el caso de San Diego, el ritmo de publicación (casi un trabajo cada 10 días) perece, a posteriori, merecedor de sospecha. Sin embargo, aunque iría en detrimento de la reputación de un autor el "ir goteando trabajos por doquier", afirma Sharp, no existe un número mágico que señale el límite de la creatividad de nadie. Según opina Baruj Benacerraf, jefe de Dana Farber, el establecimiento de un tope no beneficiaría en nada a la ciencia. No obstante, los investigadores tienden a coincidir en que las instituciones harían bien en romper el vínculo que parece unir la cifra de trabajos publicados con el prestigio o la promoción personal.

Ese enlace puede afectar a los coautores implicados involuntariamente en trabajos fraudulentos. En un número reciente de *Nature*, Walter W. Stewart y Ned Feder, del Instituto Nacional estadounidense de la Artritis, Diabetes y Enfermedades Digestivas, examinan el caso de John C. Darsee, quien, según se comprobó, había alterado los datos publicados durante su estancia en la Facultad de Medicina de la Universidad Emory y la Facultad de Medicina de Harvard.

Stewart y Feder argumentan que algunos coautores de Darsee, incluido su investigador jefe de Harvard, Eugene Braunwald, no participaron lo suficiente en la investigación para detectar los errores, y mucho menos las invenciones. Resulta difícil establecer un límite preciso al número de publicaciones en las que puede colaborar un investigador numerario o un director de departamento, pero no cabe duda, en opinión de un miembro de los Institutos Nacionales de la Salud que prefiere no revelar su nombre, "de que cualquier jefe de equipo de investigación cuyo nombre aparezca un mismo año en más de 150 trabajos no conoce exactamente lo que ocurre en su derredor".

El Niño y la Oscilación del Sur

Las perturbaciones océano-atmosféricas que resultan en anomalías térmicas en el Pacífico tropical son fenómenos recurrentes que influyen en el clima general, así como en la organización de una serie de ecosistemas marinos

Francisco Chávez

En la naturaleza hay una serie de factores que controlan la abundancia de poblaciones y, consecuentemente, la organización de comunidades. Estos factores pueden ser bióticos, como la competencia y la depredación, y físicos, como la variabilidad ambiental. Un caso extremo de variabilidad ambiental se produjo entre julio de 1982 y julio de 1983. Este período se caracterizó por temperaraturas anormalmente altas en la superficie del Pacífico oriental tropical, por valores extremadamente bajos en el índice de la Oscilación del Sur y por vientos alisios sumamente débiles sobre el Pacífico ecuatorial central y occidental.

Observáronse cambios de gran magnitud en los sistemas de convergencia y precipitación, que trajeron como consecuencia duras sequías en Australia e Indonesia y fuertes lluvias sobre el Pacífico central y oriental y las costas de Ecuador y Perú. Simultáneamente, hubo una drástica caída de la productividad del ecosistema marino en el Pacífico oriental tropical. Todos estos acontecimientos fueron resultado de uno de los más intensos episodios de un fenómeno oceano-atmosférico que forma parte del ciclo de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*.

Estos sucesos se presentan con una frecuencia de tres y ocho años y con variable intensidad. Hace casi un siglo, en 1891, el norte del Perú conoció también grandes trastornos climáticos. Los científicos peruanos de la época, en especial Víctor Eguiguren, atribuyeron dichas alteraciones a la intensificación de una corriente cálida que provenía del norte, del golfo de Guayaquil posiblemente; familiar a los marineros del puerto de Paita, la habían éstos bautizado con el nombre de *El Niño*, por presentarse en esa zona cerca de la Navidad. Tratábase de una conclusión lógica, dados los conocimientos de esa época.

Más adelante, el alemán Schott habló de la corriente del Niño para designar movimientos de masas de agua en mayor escala. Observó, en 1925, un avance de aguas de la región de Galápagos hacia la costa de Perú. Hoy se conoce que, durante los años que ocurren estos fenómenos climáticos, las anomalías térmicas positivas en el Pacífico ecuatorial se extienden de la costa del Perú hasta la línea de fecha. (Por la línea de fecha se entiende 180 grados de longitud.) De ese modo, la corriente del Niño, pequeña e inofensiva, dio nombre a un fenómeno de gran escala que arrastra graves consecuencias.

Al meteorólogo Jacob Bjerknes debemos, por último, haber descubierto la relación establecida entre las anomalías térmicas del oceano Pacífico y la variación en la Oscilación del Sur. Ocurría ello en la década de los sesenta; con anterioridad, en 1925, sir Gilbert Walker se refirió al fenómeno que denominó *Oscilación del Sur*, con estas palabras: "Cuando hay alta presión sobre el oceano Pacífico, tiende a haber baja presión sobre el oceano Indico". La Oscilación del Sur tiene por índice la diferencia entre la presión atmosférica de la isla de Pascua, en Chile, y la ciudad australiana de Darwin. Comprende dos de los cuatro sistemas atmosféricos principales del globo: el anticiclón del Sur y la zona de baja presión de la Baja Indonesia. El anticiclón del Sur, el mayor de los sistemas subtropicales de altas presiones del hemisferio meridional, está centrado sobre la isla de Pascua y se caracteriza por una fluctuación estacional irrelevante y grandes variaciones interanuales. Por su parte, la Baja Indonesia queda situada sobre la mayor región de agua cálida del globo y presenta una amplia variación estacional a través de migraciones meridionales. La circulación atmosférica del hemisferio Norte está dominada por acontecimientos estacionales, mientras que en el hemisferio meridional predominan las fluctuaciones interanuales. La Oscilación del Sur, al unir estos dos regímenes, constituye una expresión global de variabilidad atmosférica.

En condiciones normales, cuando la diferencia de presión es alta, del anticiclón del Sur soplan vientos superficiales, en este caso los alisios, hacia la Baja Indonesia y crean la Corriente Ecuatorial Sur, que transporta agua de Este a Oeste. Las aguas de esa corriente se hallan expuestas a la incidencia continua del sol tropical; se produce, así, acumulación de agua y calor en el Pacífico occidental. Al extraer, en su curso, calor del Pacífico oriental, las aguas de éste se mantienen templadas. Bjerknes observó que la relación entre el oceano y la atmósfera recordaba la relación entre el huevo y la gallina: para que se desencadenaran los vientos alisios se precisaba la diferencia de presión generada por las aguas templadas en el Pacífico oriental y las aguas cálidas en el Pacífico occidental; para que hubiera aguas templadas en el Pacífico oriental y cálidas en el occidental se necesitaban los vientos alisios.

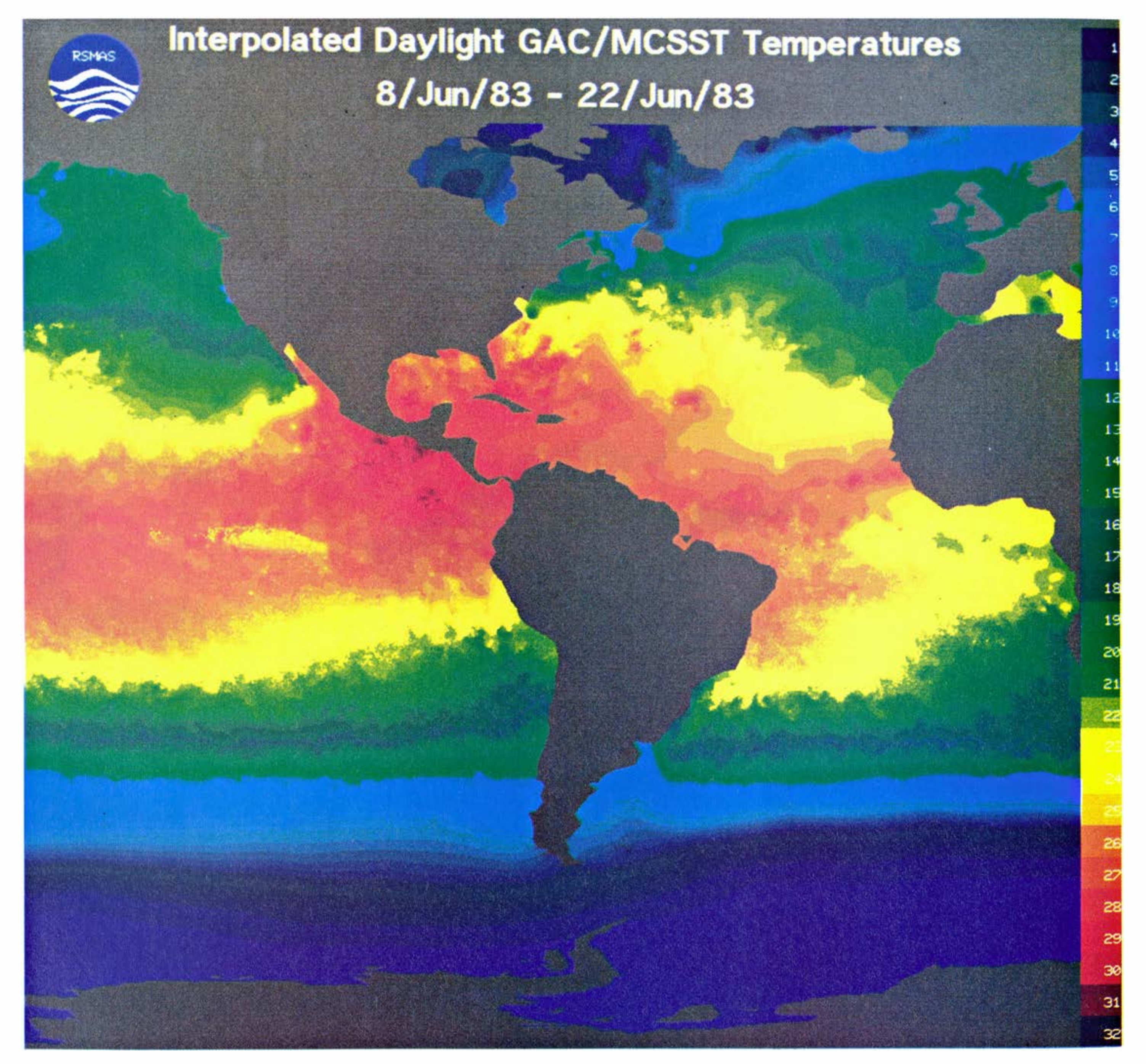
Pero la situación de desequilibrio entre ambos lados del Pacífico no se limita a la superficie del oceano. La acumulación de agua caliente eleva el nivel del mar en la parte occidental, donde la zona superficial, o capa de mezcla, y la termoclina son profundas. El Pacífico oriental tiene más bajo el nivel y, poco profundas, la capa de mezcla y la termoclina. (Llámase termoclina al gradiente térmico entre las aguas superficiales más cálidas y las aguas frías a mayores profundidades.) Estos dos factores, la profundidad de la capa de mezcla y de la termoclina, tienen consecuencias biológicas. En los oceanos, la fotosíntesis está limitada, por la luz, a la zona superficial. Si la capa de mezcla es profunda y sobre-

pasa los niveles hasta donde penetra verticalmente la luz solar, se frena el crecimiento del fitoplancton, primer eslabón de los ecosistemas marinos.

Además de luz, el fitoplancton necesita, para su desarrollo, nutrientes. La termoclina es una región que registra cambios rápidos en la temperatura, así como en las concentraciones de elementos nutritivos para el reino vegetal (nitratos, fosfatos y silicatos). La concentración de estos nutrientes es mayor por debajo de la termoclina y menor por encima de la misma. En el Pacífico oriental tropical, la cercanía de los elementos nutritivos a la superficie y las óptimas condiciones de luz convierten, a este zona, en una de las áreas oceánicas más productivas.

Los vientos meridionales que soplan hacia la zona ecuatorial, bordeando las costas peruanas, crean el afloramiento costero; los vientos alisios son, por su parte, responsables del afloramiento ecuatorial. En el proceso de afloramiento, ascienden a la superficie aguas que se hallaban a 50 o 100 metros de profundidad. Puesto que en el Pacífico oriental tropical la nutriclina y la termoclina se encuentran cerca de la superficie, las aguas emergidas presentan altos niveles de nutrientes y bajas temperaturas. Klaus Wyrtki, de la Universidad de Hawai, describe el afloramiento que ocurre en el Pacífico tropical como " ... una lengua de aguas frías que se extiende de la costa del Perú a la línea de fecha..."

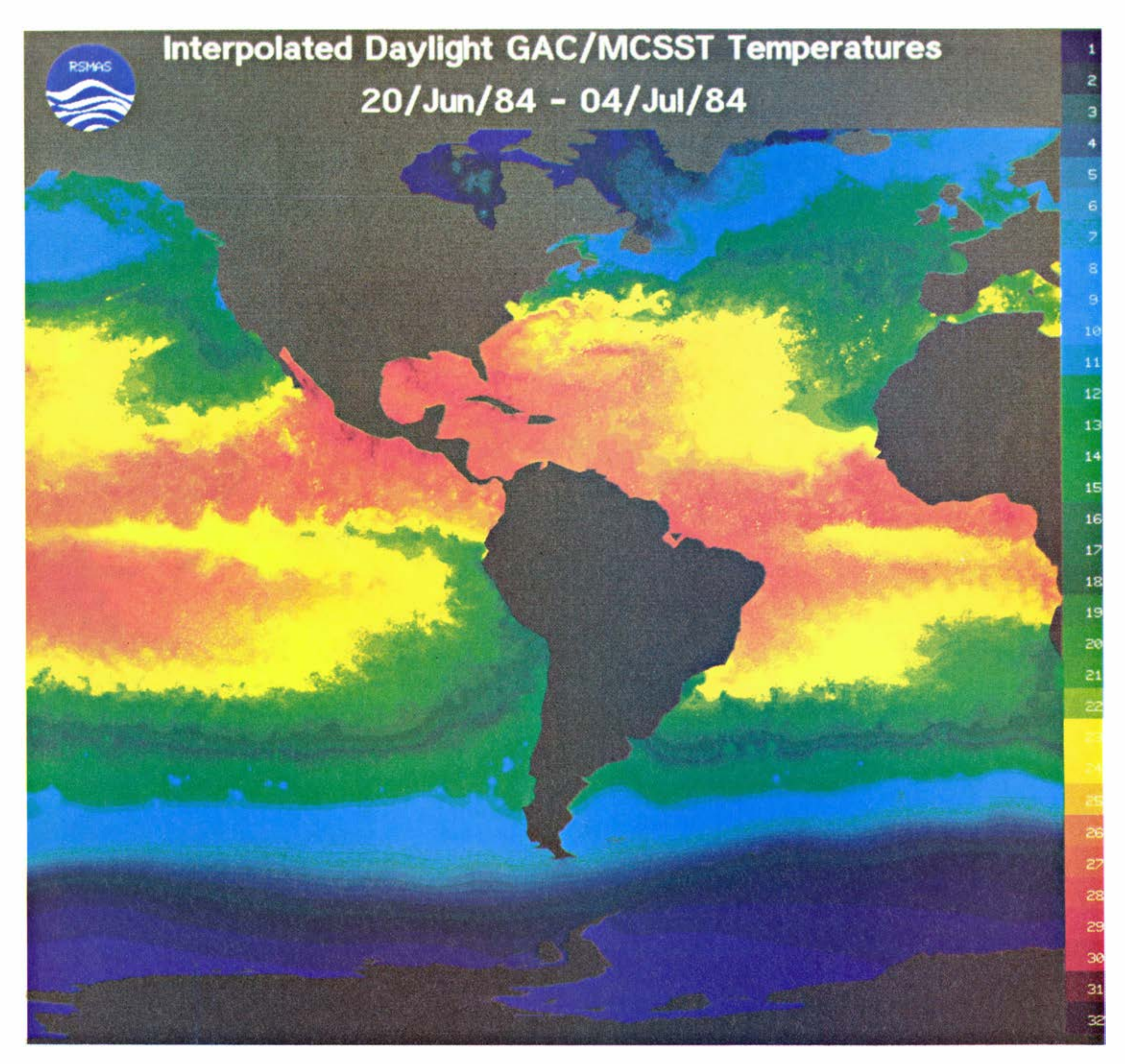
Los fenómenos de afloramiento costero y ecuatorial difieren en sus características físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista biológico podemos dividir el Pacífico oriental tropical en tres zonas: la región de afloramiento costero con una productivi-



1. TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR durante el mes de junio de 1983, en que se desarrolló un episodio del Niño. (Compárese con la situación del mismo mes del año siguiente que fue normal y que aparece ilustrada en la figura 2.) La zona ecuatorial del Pacífico queda cubierta de aguas cálidas. En las zonas litorales de California, Chile y especialmente Perú, y también en la zona ártica del Pacífico, la temperatura superficial del mar es más elevada durante el Niño.

dad primaria de 1000 gramos de carbono por metro cuadrado y año, en promedio; la región entre la costa de Sudamérica y las islas Galápagos, éstas incluidas, con una productividad media de 365 gramos de carbono por metro cuadrado y año, y, por fin, la región ecuatorial al oeste de las islas Galápagos, con una productividad de 175 gramos de carbono por metro cuadrado y año, en promedio también. Aun cuando la intensidad de producción en el afloramiento costero casi quintuplica la registrada en el afloramiento ecuatorial, por unidad de área, la zona ecuatorial abarca una extensión 100 veces superior que la zona costera; la productividad total de la ecuatorial es, pues, mayor.

La intensidad de producción incide en la productividad de los niveles tróficos más altos. John Ryther, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, ha sugerido que las regiones de afloramiento costero, que ocupan el 1 por ciento del área del oceano, producirían el 50 por ciento de la proteína de origen marino. Ramón Margalef, de la Universidad de Barcelona, sostiene que la riqueza biológica de una región oceánica depende de la cantidad de energía externa –por ejemplo, el viento y el sol– que recibe la región, así como el rendimiento de un campo cultivado depende de la energía invertida en las faenas de fertilización, riego y laboreo realizadas por el agricultor. Apoyados en esto, parece lógico que la región del Pacífico oriental tropical sea tan productiva: posee el mayor sistema de vientos del globo y, por hallarse cerca



2. EN EL PACIFICO, se distingue claramente una lengua fría producto del afloramiento, que se extiende de la costa de Sudamérica hacia la línea de fecha, a lo largo de la zona ecuatorial; rasgo que no se aprecia, sin embargo, en el episodio del Niño. En condiciones normales la Zona de Interconvergencia Tropical se encuentra sobre la zona de aguas cálidas al norte de la zona ecuatorial del Atlántico y el Pacífico. Esta zona de convergencia varía estacionalmente en su posición meridional y quizás intervenga en el desencadenamiento del Niño. Durante un episodio de éste, ocupa una posición mucho más sureña de lo normal, lo que provoca lluvias sobre Ecuador y Perú y sequías sobre Centroamérica. En el Atlántico, se produce en 1984 un fenómeno muy similar al Niño.

de la zona ecuatorial, abunda allí la luz solar.

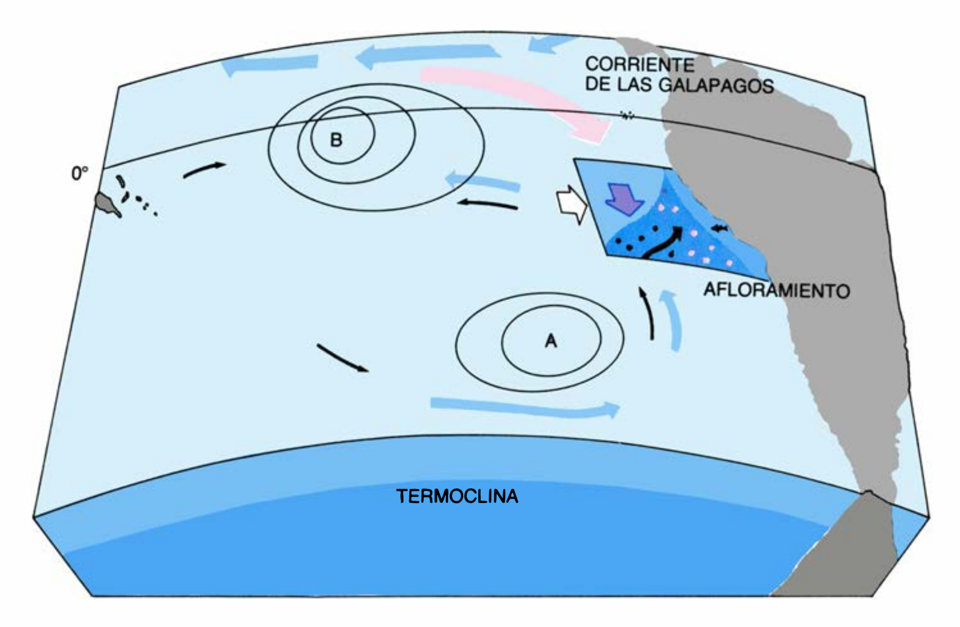
Los vientos alisios, responsables de la alta productividad del Pacífico oriental, hacen también vulnerables, a estas regiones, a sus variaciones. La mayoría de las teorías sobre el origen del Niño sugieren que su desencadenamiento es el resultado de vientos anómalos en el Pacífico occidental tropical. De acuerdo con uno de los modelos avanzados, poco a poco se iría ampliando la zona de aguas cálidas del Pacífico occidental, lo que engendraría una migración de la Baja Indonesia hacia el Este. Los vientos anómalos que soplarían al oeste del sistema de baja presión crearían ondas que modificarían la estructura térmica del oceano Pacífico, hundiendo la termoclina (y también la nutriclina) en el Pacífico oriental tropical, al tiempo que instarían la redistribución de masa y calor que forman parte integral del Niño. Una vez acumulado cierto volumen de agua y calor en el Pacífico occidental tropical, El Niño representaría la válvula de escape de esta energía hacia el Este y hacia los polos. Con el calentamiento del Pacífico oriental tropical se fomentaría la migración de los sistemas de convergencia y se agudizarían las condiciones anormales del oceano.

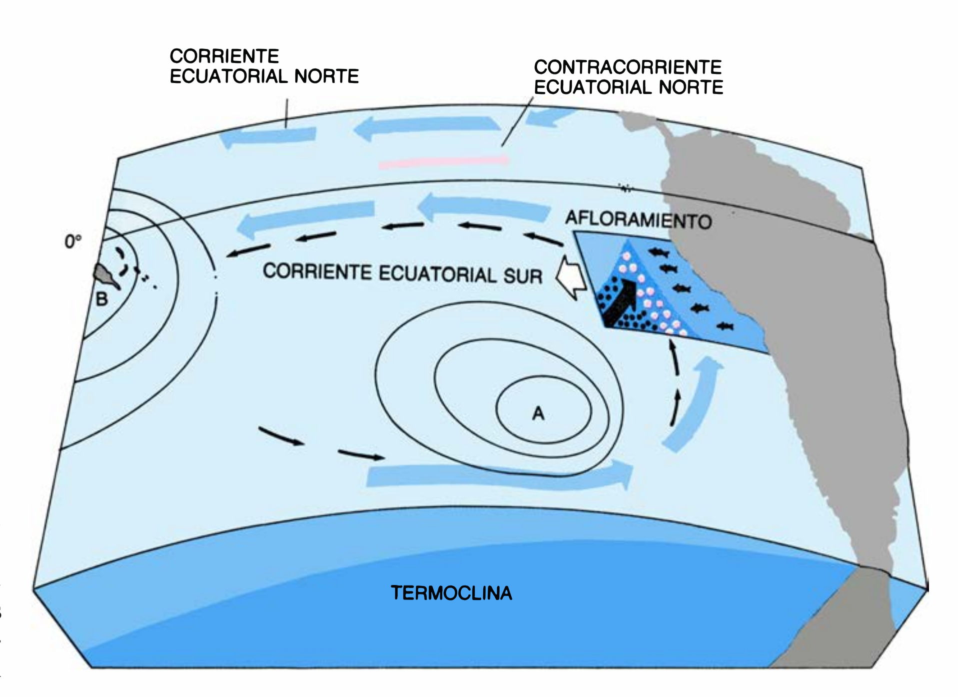
En el pasado, creíase que el afloramiento costero desaparecía durante el desarrollo del Niño. La verdad es que los vientos responsables del afloramiento costero no sólo persisten, sino que incluso se intensifican. Aun cuando prosigue el afloramiento durante esos episodios, la acumulación, en el Pacífico oriental tropical, de aguas calientes y pobres en nutrientes por encima de una termoclina y una nutriclina profundas determina que el agua emergida resulte menos ventajosa para el ecosistema. En consecuencia, la producción fitoplanctónica o primaria mengua, en el Pacífico oriental tropical, durante los fenómenos del Niño.

La reducción en la producción de materia orgánica afecta al crecimiento y la reproducción del plancton animal, los peces, las aves y los mamíferos marinos. La redistribución del agua que acontece durante un episodio procede de oeste a este en la zona ecuatorial y desde ésta hacia los polos junto a las costas de América. La profundización de la termoclina, la caída de la productividad primaria y la redistribución de los organismos, pasiva en unos casos y activa, en otros, explican muchas de las observaciones biológicas que se realizaron durante 1982-1983.

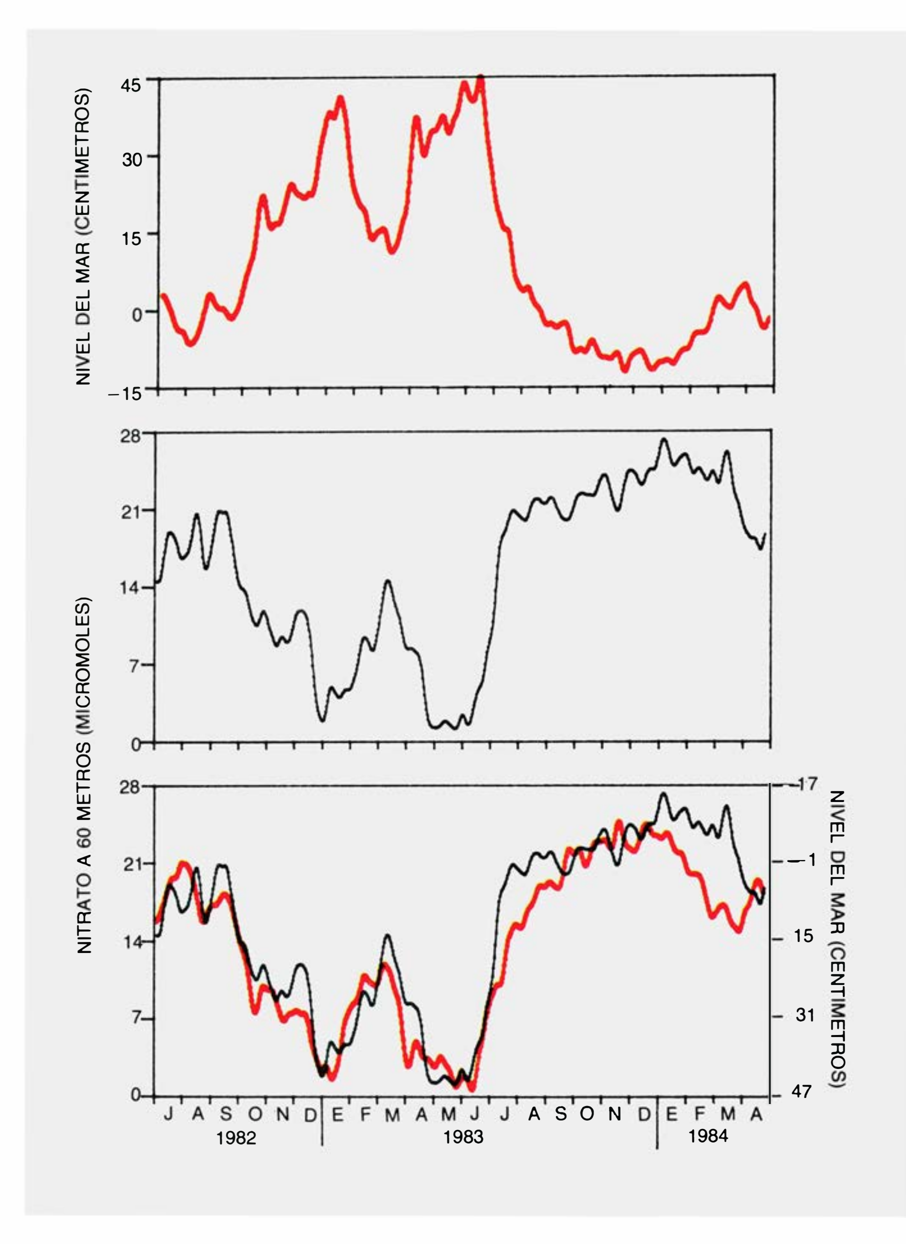
No hay dos episodios del Niño exactamente iguales. El más severo de los que se tenga noticia correspondió al de 1982-1983. Cabe pensar, pues, que durante el mismo se produjo la gama más completa de procesos asociados a su aparición. Por fortuna, antes de su inicio existía una serie de programas de observación del Pacífico ecuatorial que posibilitó que ese acontecimiento fuera el mejor documentado.

El programa que dirigía Richard Barber, de la Universidad de Duke, consistía en muestreos oceanográficos en dos estaciones fijas: instalada una en Puerto Ayora (islas Galápagos, Ecuador) y la otra en Paita (Perú). Las muestras recogidas en esos dos puntos clave y el estudio de las mismas permiten describir el desarrollo del fenómeno. Los vientos anómalos que desencadenaron ese episodio soplaron, en el Pacífico occidental, durante el





3. MAPA DEL PACIFICO donde se han cartografiado algunos cambios ocenaográficos y meteorológicos durante El Niño. En condiciones normales, los vientos que soplan del Anticiclón del Sur hacia la Baja Indonesia mantienen la Corriente Ecuatorial Sur que transporta agua y calor al Pacífico occidental. Estos procesos crean una termoclina poco profunda en el Pacífico oriental y otra profunda en el occidental. El Niño constituye la válvula de escape de la energía potencial acumulada en el Pacífico occidental. Parte de la redistribución de agua y calor durante un episodio del Niño ocurre a través de la Contracorriente Ecuatorial Norte. Durante El Niño, la zona rica en sustancias nutritivas, creada por el afloramiento junto a las costas del Perú, se reduce a una pequeña franja, lo que resulta en menor producción de fitoplacton. El comienzo del Niño parece ser el resultado de vientos anómalos que se generan por la migración de la Baja Indonesia.



4. RELACION ENTRE EL NIVEL DEL MAR Y LA CONCENTRACION DE NITRATOS a 60 metros en Paita, durante los años 1982, 1983 y 1984. Los dos picos del episodio coinciden con la subida del nivel del mar y la profundización de la nutriclina, cuyo máximos se producen en enero y mayo de 1983. El afloramiento lleva a la superficie agua de 50 o 100 metros más abajo; la concentración de nutrientes en estas aguas define la magnitud de producción primaria en el Pacífico oriental tropical. (El nivel del mar lo midió de forma continua David Enfield, de la Universidad de Oregon. Las muestras de nitrato se recogieron tres veces por semana con botellas Niskin desde una barca. Se han filtrado los datos para eliminar así altas frecuencias.)

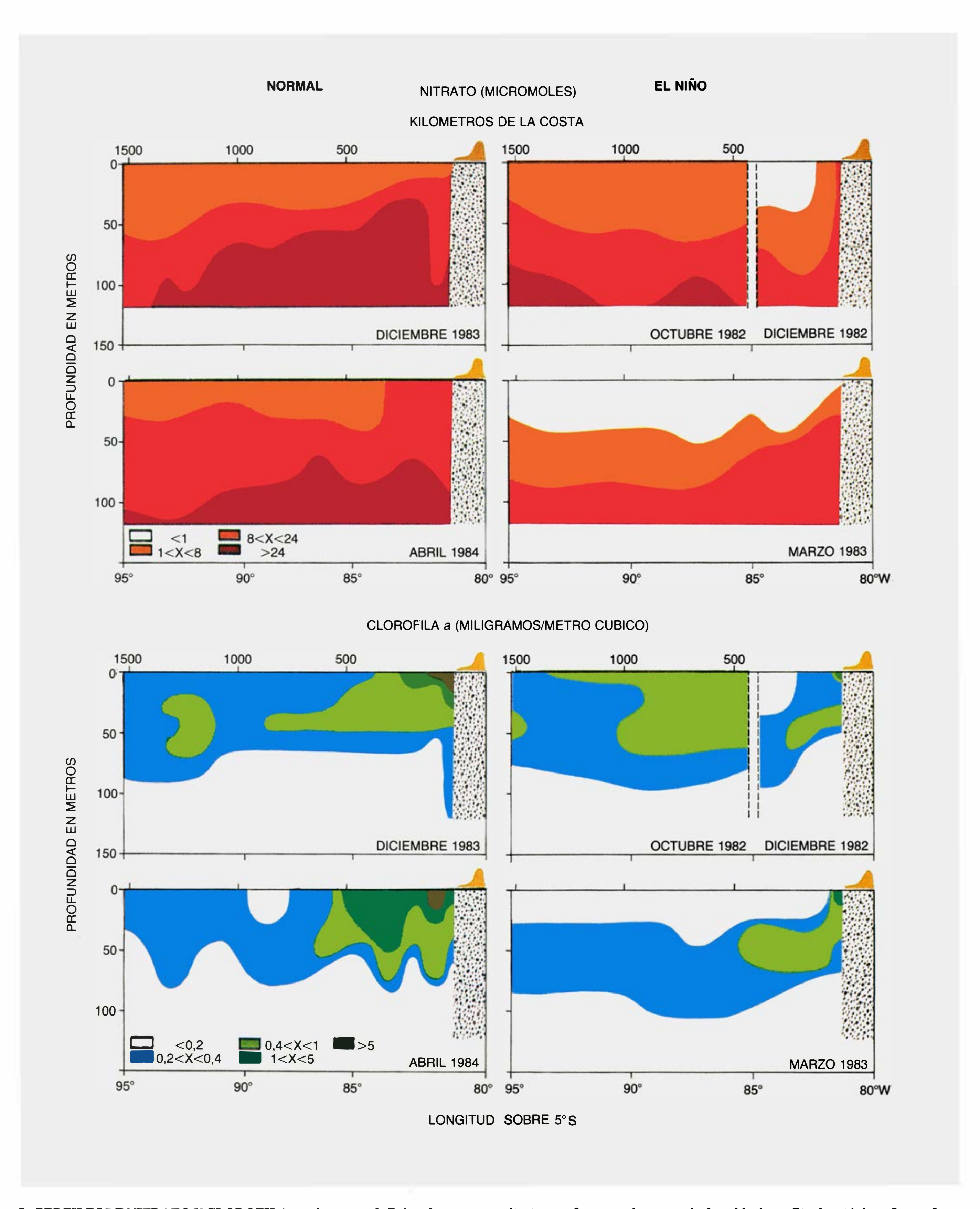
mes de junio de 1982. Las ondas que transmiten la señal de oeste a este en la zona ecuatorial son las ondas Kelvin; presentan una velocidad aproximada de tres metro por segundo: tardan, pues, un par de meses en cruzar el Pacífico. Las ondas comenzaron el drenaje de agua caliente del Pacífico occidental y el nivel del mar empezó a subir en agosto de 1982 en las islas Galápagos; al mes ocurría lo propio en la estación de Paita. Al elevarse el nivel del mar y ahondarse la nutriclina, las aguas emergidas en la vecindad de la costa y a lo largo de la zona ecuatorial son más pobres en nutrientes.

La primera fase de un episodio del Niño se caracteriza por la profundización de la capa de la nutriclina, manteniendo nutrientes en la superficie en concentraciones que no limitan todavía el desarrollo del fitoplancton. Es posible que algunos episodios del Niño no avancen más allá de esta fase. El efecto biológico de la misma, sobre el plancton vegetal de la zona costera, estriba en la caída de la productividad primaria por la limitación de luz a través de una capa de mezcla profunda. Las zonas ecuatoriales del Atlántico y el Pacífico nunca alcanzan abundantes concentraciones de fitoplancton, aun cuando las condiciones de luz y nutrientes sean óptimas; ello explica que la incidencia del Niño en el fitoplancton de la zona ecuatorial sea menos drástica que en la zona litoral.

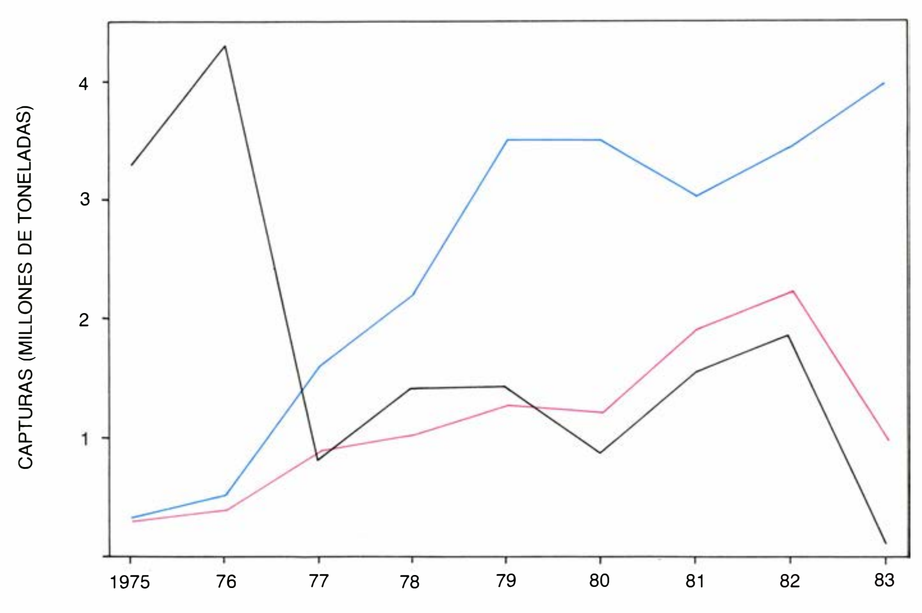
Después de la fase de profundización se observan los procesos más lentos, asociados con el transporte de corrientes de agua. Entre octubre y noviembre de 1982, aguas superficiales del norte y el oeste, pobres en nutrientes, ocuparon las regiones donde solían observarse elevadas concentraciones de nutrientes en la superficie. El frente ecuatorial suele situarse en torno a los 2 grados de latitud Norte; se extiende desde las costas sudamericanas hasta la línea de fecha. Dicho frente separa aguas pobres, cálidas y poco salubres, de las aguas frías y ricas que acaban de aflorar. El avance de corrientes septentrionales del frente ecuatorial se deja sentir, primero, en las islas Galápagos y, luego, en Paita. Todo parece indicar que fue ese el avance de aguas que observó Schott en 1925; para evitar su confusión con la corriente auténtica del Niño, he sugerido denominarla corriente de los Galápagos. Al sur de los 6 grados de latitud Sur, donde la influencia de estas aguas es menor, se produce un acercamiento a la costa de aguas subtropicales superficiales. Aproximación que responde a los cambios de gran escala registrados en el círculo anticiclónico del Pacífico meridional durante el episodio del Niño.

Durante el episodio de 1982-1983 se observaron dos profundizaciones de la termoclina, una forzada por vientos del Pacífico occidental y, la segunda, por vientos del Pacífico oriental. Las condiciones anormales llegaron a un estado máximo durante la segunda profundización, en mayo de 1983, cuando el oceano eutrófico inmediato al Perú adquirió las características de un mar oligotrófico. Incluso en las peores circunstancias, entendiendo por tales las condiciones de anomalía extrema, las aguas superficiales muy próximas a la costa continúan abasteciéndose de nutrientes. El afloramiento mantiene una franja costera, mucho más angosta que durante la vigencia de condiciones normales, rica en fitoplancton. El plancton vegetal de la franja costera sirve de alimento para los organismos de un nuevo ecosistema que se desarrolla a raíz de los cambios producidos en la distribución de organismos y en el medio marítimo de la región.

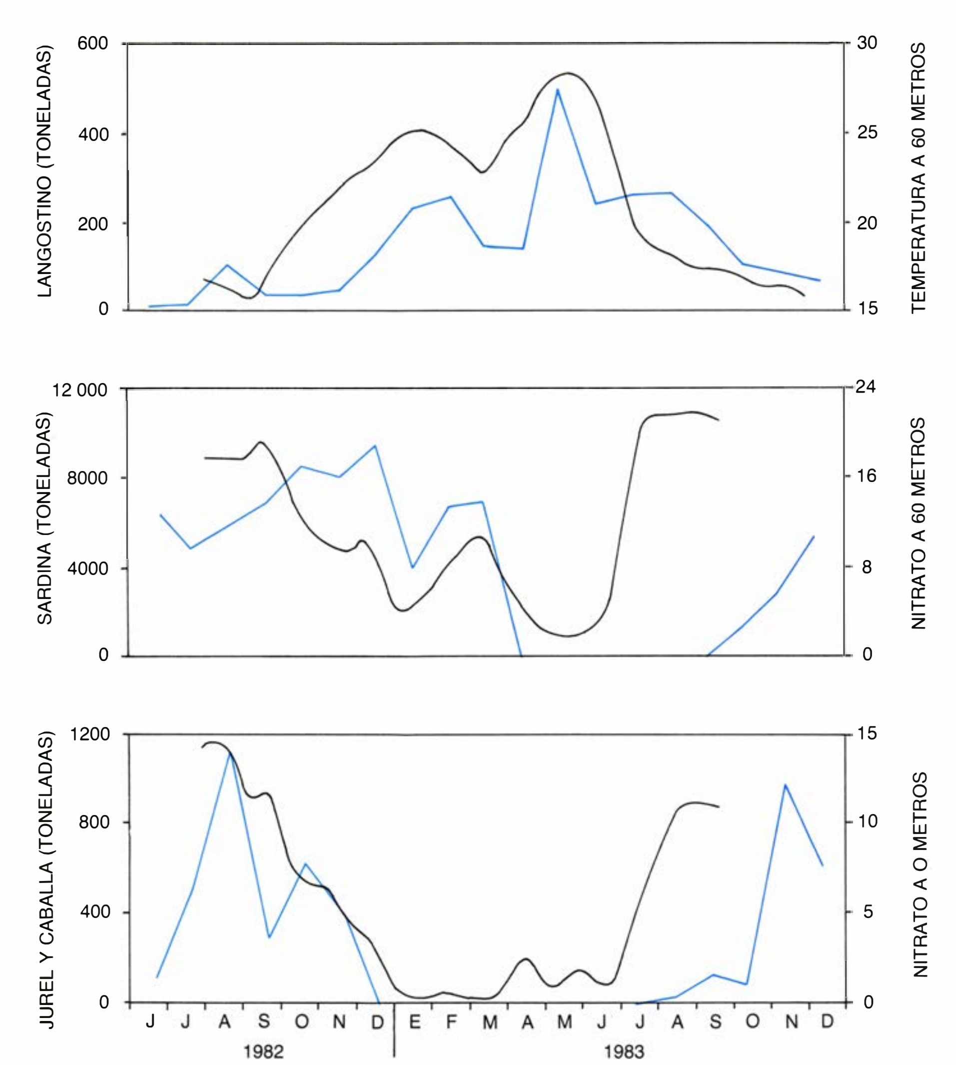
En el año 1917, el científico peruano Lavalle y García sugirió que la abundancia de dinoflageladas, organismos



5. PERFILES DE NITRATO Y CLOROFILA *a* en las costas de Paita, durante las dos fases del Niño y durante condiciones normales. El elemento que limita la producción primaria en el océano es el nitrógeno: la concentración de nitrato en la capa superficial constituye un índice de la fertilidad del ecosistema. Por su parte, la clorofila *a* mide la abundancia del fitoplancton, cuyos organismos integran el primer eslabón de la cadena trófica. Durante las condiciones normales, la nutriclina tiende a alojarse más cerca de la superficie, en Sudamérica. (He definido la nutriclina como la franja situada entre 8 y 24 milimoles de nitrato.) Gracias al afloramiento, llegan a la superficie abundantes concentraciones de nitrato, que favorecen la presencia de poblaciones fitoplanctónicas. La profundización de la nutriclina por las ondas Kelvin resulta evidente en el perfil durante el mes de octubre del año 1982, si bien la concentración de nutrientes en la superficie sigue siendo alta. Para el mes de diciembre de ese mismo año se advierte ya el avance de las aguas tropicales superficiales que suelen ocupar el norte del Frente Ecuatorial. Estas aguas, que resultan ser pobres en nitrato, se mantienen alejadas de la costa ante la oposición del afloramiento costero que alimenta con nutrientes una pequeña franja. En marzo de 1983 toda la zona queda cubierta por aguas pobres en nitratos y, consecuentemente, menguadas en fitoplancton.



6. CAMBIOS EN LA CAPTURA DE PECES PELAGICOS en los países del Pacífico sudeste (Chile, Ecuador y Perú) desde 1975 hasta 1983. Se comprobó, a través del examen de los sedimentos, la ocurrencia de episodios esporádicos de abundancia de sardina (*color azul*); sin embargo, la especie que domina normalmente en esta región es la anchoveta (*en negro*). En rojo se ofrece la evolucion sufrida en la concentración de jurel.



7. CAPTURA DE RECURSOS VIVOS Y CAMBIOS OCEANOGRAFICOS. La relación que guardan mutuamente (en azul los organismos y en negro el parámetro físico) se ilustra aquí ejemplificada en Paita, durante el bienio 1982-1983. La captura de langostinos y sardina se relaciona con las variaciones de la termoclina y nutriclina. La sardina disminuye con la profundización de la termoclina, aumentando, por contra, la captura de langostinos. La pesca de jurel y caballa está ligada a la presencia de aguas tropicales.

del fitoplancton, incrementaba durante los episodios del Niño. Ello es cierto en algunos casos, como corroboró la proliferación de *Gymnodinium splendens* a lo largo de 1976. Pero no ocurre siempre; durante 1982 y 1983, la estación fija de Paita no observó ningún incremento absoluto en la abundancia de dinoflageladas; antes bien, la concentración de diatomeas, plancton vegetal típico de regiones de afloramiento, cayó notablemente. Las condiciones en Paita comenzaron a normalizarse en julio de 1983. Para octubre de ese mismo año, habían desaparecido las anomalías térmicas; tornaron entonces las altas concentraciones de diatomeas, grupo que predominó hasta el verano del año siguiente (es decir, febrero de 1984), cuando la estratificación de la columna de agua estimuló el crecimiento de las dinoflageladas.

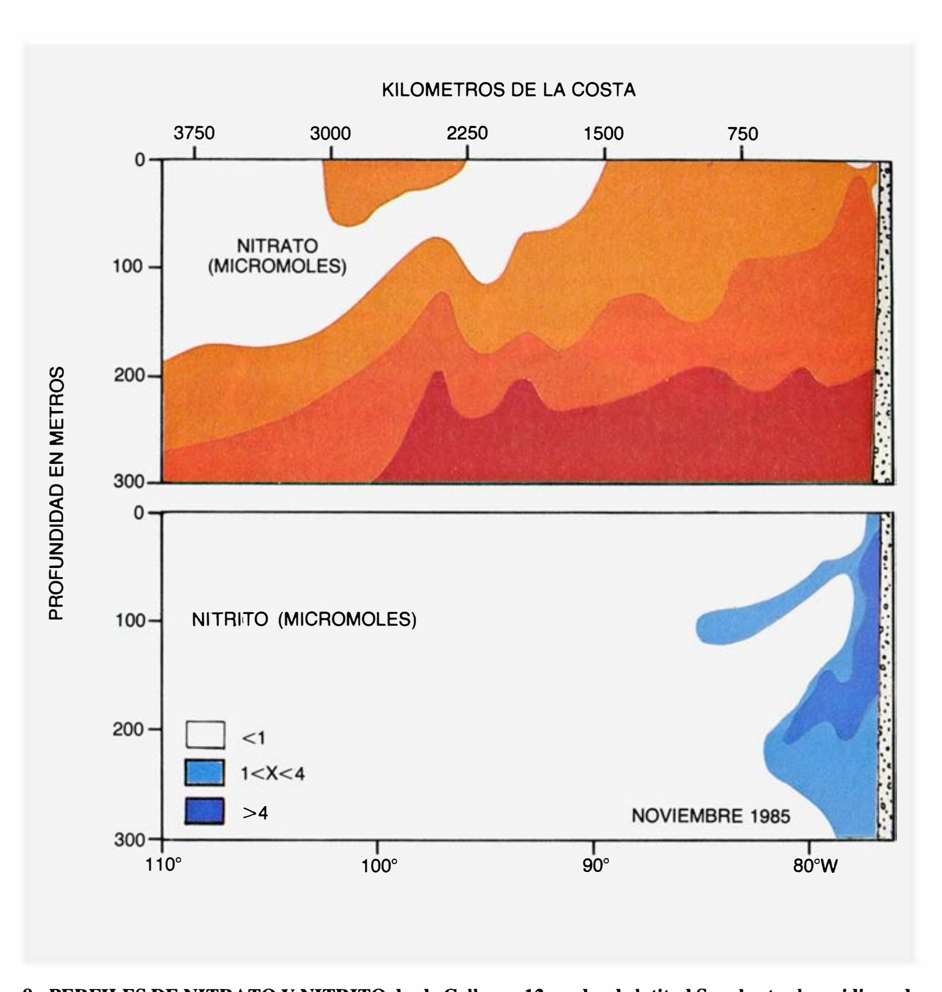
El último ciclo estacional descrito no se presentó durante el verano de 1983. La discrepancia entre lo que sucedió en 1976 y 1983 hay que buscarla en la intensidad del episodio. El de 1976 fue leve y se desarrolló como una prolongación de las condiciones estivales que favorecieron la acumulación de dinoflageladas. Los escasos datos que poseemos de 1976 hablan de concentraciones bastante altas de nutrientes en la superficie; por contra, durante el episodio de 1983 los nutrientes cayeron muy por debajo de las concentraciones que limitan el crecimiento del fitoplancton.

Hubo más. Asociados con los cambios oceanográficos y de abundancia de fitoplancton durante 1982-1983 se produjeron drásticas alteraciones en todos los niveles tróficos del ecosistema. Por citar algunos ejemplos significativos, la ictiofauna típica de las islas Galápagos, como el bacalao (*Mycteroperca olfax*), el camotillo (*Paralabrax darwini*) y el pez loro (*Nicholsina denticulata*), disminuyó bruscamente; hubo, sin embargo, un incremento en otras especies que suelen medrar en el Pacífico oriental y la región septentrional del frente ecuatorial, como el dorado (*Coryphaena hippurus*).

Aproximadamente el 50 por ciento de las iguanas marinas de las islas Galápagos (*Amblyrhyncus cristatus*) murió durante 1982-1983, como probable resultado de los cambios registrados en la flora algal que constituye la fuente alimenticia de estos reptiles. En la población local de focas peleteras (*Arctocephalus galapagoensis*) perecieron todos los jóvenes, incluidos los de dos y tres años, ante la severa restricción

alimentaria. La influencia del Niño sobre las aves marinas se manifiesta en tres aspectos: fracaso reproductor, migración en masa y acentuada mortandad. En los Galápagos, las especies más afectadas fueron el pingüino de la región (*Spheniscus mendiculus*) y el cormorán no volador (*Nannopterum harrisi*), cuyas poblaciones se contrajeron en un 78 por ciento y en un 45 por ciento, respectivamente. También vieron mermado su número corales, cirrípedos, esponjas, equinodermos, poliquetos y otros invertebrados. En particular, resulta difícil explicar el motivo de la mortandad de corales en el Pacífico oriental tropical, desde las Galápagos hasta el golfo de Chiriqui, en Panamá, pues es sabido que los corales sobreviven muy bien en aguas cálidas.

Los investigadores del Instituto del Mar de Perú, y en especial Rómulo Jordán, actual secretario de la Comisión Permanente del Pacífico meridional, han venido trabajando sobre la relación que existe entre la abundancia de aves guananeras, la de peces pelágicos y las temperaturas superficiales en las costas peruanas. La disminución de las poblaciones de aves guananeras guarda una relación persistente con la aparición del Niño. Los cambios registrados en las poblaciones de aves guananeras parecen obedecer a las alteraciones producidas en la abundancia y accesibilidad de la anchoveta (*Engraulis ringens*).



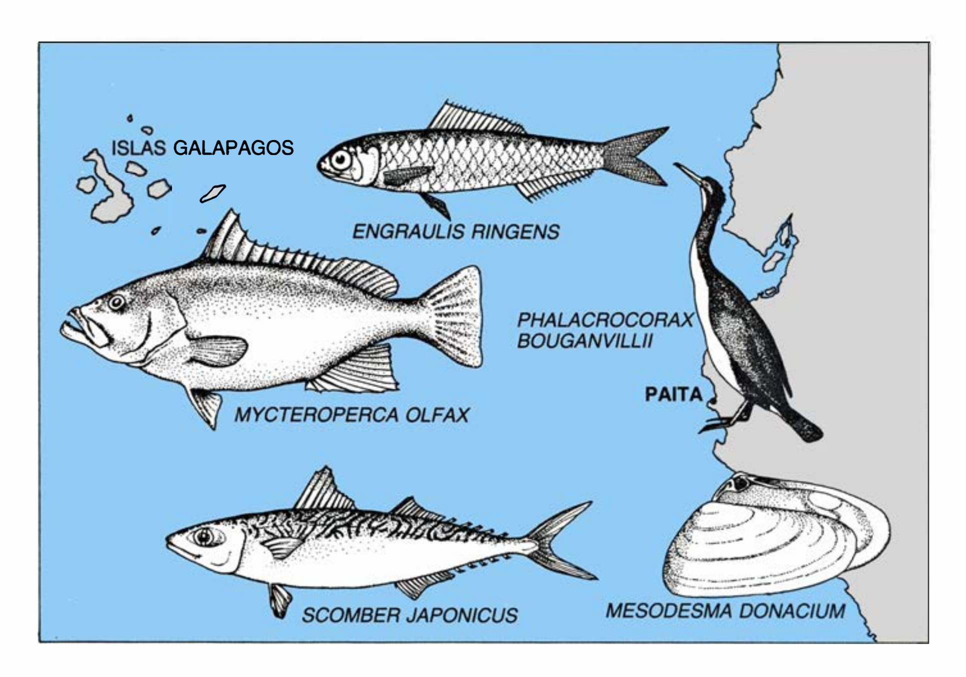
8. PERFILES DE NITRATO Y NITRITO desde Callao, a 12 grados de latitud Sur, hasta el meridiano de 110 grados de longitud Oeste, durante el mes de noviembre de 1985. En la desnitrificación, el nitrato se descompone en nitrógeno gaseoso con el paso intermedio de formación de nitrito. Los perfiles demuestran la abundante desnitrificación que se observó frente al Perú tras el episodio de 1982-1983. El trabajo se realizó a bordo del buque oceanográfico *Researcher*, de la Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera, formando parte del proyecto EPOCS (siglas que corresponden, en su traducción, a "investigaciones sobre el clima en el océano Pacífico ecuatorial"). Entre sus propósitos, el proyecto pretende medir el transporte de la Corriente Ecuatorial Sur para definir las condiciones iniciales en modelos de circulación. En el año en curso se persigue obtener el perfil a lo largo de los 15 grados de latitud Sur, de Perú a Australia.

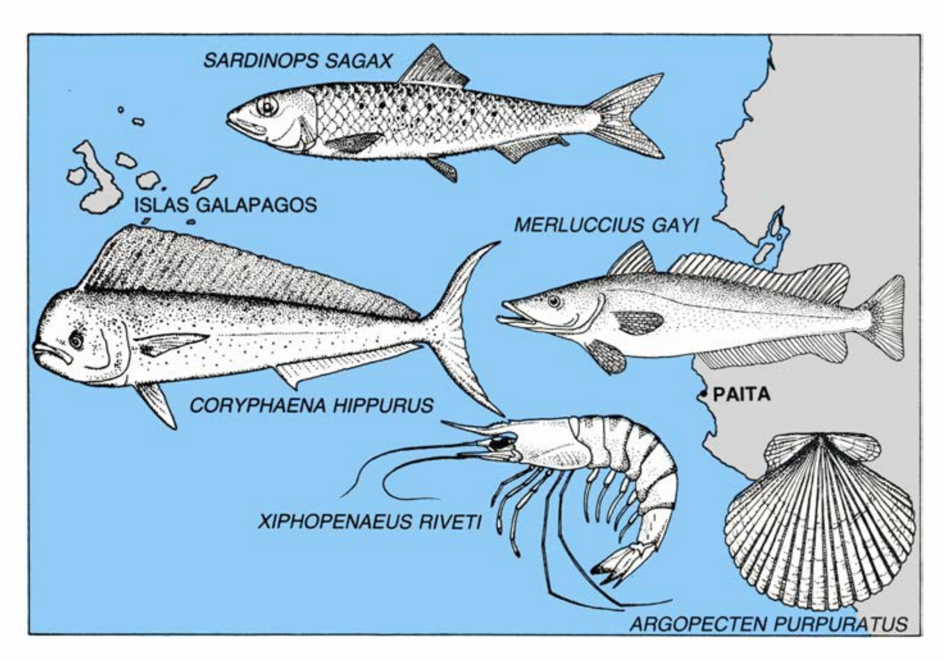
A partir de los años 60, cuando el hombre acomete la captura industrial de la anchoveta, la recuperación de las aves guananeras tras los episodios del Niño se torna más difícil. Los bancos de anchoveta fueron menguando paulatinamente con cada evento de ésos, hasta que desapareció por completo de la pesca ribereña de las costas peruanas en 1983. El guanay (*Phalacrocorax bouganvillii*) se alimenta, casi exclusivamente, de anchoveta; el ave, que en 1974 era la de mayor importancia, se ha visto severamente afectado por el declive de la anchoveta. El piquero (*Sula variegata*), que suplantó al guanay desde 1974 en el primer lugar, tiene una dieta más variada, anchoveta incluida.

El declive de la anchoveta deja expedito el camino para el crecimiento demográfico de la sardina (*Sardinops sagax*), convertida en especie principal del Pacífico sudeste en las postrimerías de la década de los 70. En enero de 1983 la sardina desapareció de la costa ecuatoriana, se mantuvo constante en la peruana y cobró un notable incremento en la chilena. Los efectos del episodio de 1982-1983, por lo que al comportamiento de la sardina ante las costas peruanas se refiere, posibilitaron su asentamiento en la estrecha zona de afloramiento, inmediata a la costa; ello la hizo vulnerable a la acción pesquera. Este comportamiento fue similar al observado durante los episodios de 1972 y 1976. Lo peculiar del episodio de 1983 fue la migración hacia el sur, comprobada por captura en Chile de especímenes marcados en el Perú. La variación en la abundancia de la sardina en Paita estuvo íntimamente ligada a la variación registrada en la nutriclina. A pesar de la cuantía pescada, los especímenes capturados presentaban niveles muy bajos de aceite y su relación de peso por tamaño era baja, prueba de que la caída de la producción primaria durante el episodio de 1982-1983 afectó a varios niveles tróficos.

El jurel (*Trachurus symmetricus*) y la caballa (*Scomber japonicus*) son especies que ocupan una región más alejada de la costa que la sardina. Desaparecieron de la zona de Paita en noviembre de 1982, con el avance de las aguas ecuatoriales superficiales hacia la región donde suelen medrar. El jurel y la caballa sobrevivieron al episodio cambiando su dieta de anchoveta, presa preferida en tiempos normales, a una dieta de peces mesopelágicos, característicos de aguas oceánicas o ecuatoriales, y, en algunos casos, a peces propios de la región panameña (*Bregamaceros bathymaster*). Lo que nos confirma que, durante El Niño, se produce una redistribución de organismos consonante con la redistribución de masa y calor. El jurel y la caballa fueron, a su vez, presa de otros peces: el dorado y varias especies de atún (*Thunnus* spp.), que ampliaron su distribución y fueron capturados en cantidades apreciables frente al Perú.

Los cambios en la abundancia de la merluza (*Merluccius gayi*) registrados





9. CAMBIOS EN LAS ESPECIES del Pacífico sudeste a consecuencia del Niño; arriba: algunas especies que incrementan durante o después del Niño y, abajo, algunas de las mejor adaptadas al frío.

frente a Paita están ligados también a transformaciones oceanográficas. La distribución de este pez demersal está supeditada a zonas ricas en oxígeno. Frente a las costas del Perú estas condiciones se dan sólo al norte de los 6 grados de latitud Sur, pues por debajo de esa línea predominan las situaciones de anoxia. Durante el episodio de 1982-1983, la zona de bajas concentraciones de oxígeno se ahondó a lo largo de la costa, permitiendo la migración meridional de la merluza, a mayores profundidades, escapando parcialmente de la explotación humana. Esa defensa natural explica la reaparición de la especie en la pesca artesanal, en cantidades abundantes, en 1984.

¿Qué ocurre con otras especies de interés comercial? La pesca de los principales grupos de langostinos (*Xiphopenaeus riueti*, *Penaeus* spp.) se mantuvo estable en Colombia, pero creció espectacularmente en Ecuador y Perú. En Paita, por ejemplo, el valor monetario de un mes de pesca de langostino durante El Niño sobrepasó el valor de las capturas totales de pescado de un mes normal. Pero las flotas locales no supieron aprovechar adecuadamente este recurso. La abundancia de langostinos debióse, en parte, al movimiento de organismos con las corrientes que avanzan hacia el sur, abundancia que se amplía, o aparece, con El Niño. Debióse también al ambiente favorable que se desarrolló en la región con el incremento de la temperatura del mar, al mantenimiento del afloramiento costero y al incremento de la descarga de los ríos por las intensas precipitaciones que sufrieron entonces Ecuador y Perú.

Las machas (*Mesodesmus donacium*), los choros (*Aulacomya ater*), las lapas (*Fissurella* spp.), los cangrejos (*Cancer* spp., *Platyxanthus orbigny*), los erizos (*Loxechinus albus*) y muchos otros invertebrados desaparecieron de sus zonas habituales en las costas del Perú durante El Niño. Parte de estos cambios tuvo que ver con la mortandad sufrida por estos organismos y, parte, con la migración hacia profundidades mayores, donde las condiciones les resultaban más favorables. En capas inferiores, la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) no sólo resistió El Niño, sino que alargó su radio de acción y aumentó su población. La captura llegó a 20.000 toneladas, lo que venía a multiplicar por 40 las cifras habituales. Dicho crecimiento de la concha de abanico se tradujo en una multiplicación de los pulpos (*Octopus* spp.), que, según observaciones de los pescadores de Pisco, en Perú, estaban alimentándose exclusivamente de ellas.

El episodio del Niño de 1982-1983 incidió duramente en las poblaciones de lobos marinos (*Otaria byonia* y *Arctocephalus australis*) de la zona peruana de San Juan; igual que ocurriera en las islas Galápagos, la mortandad afectó sobre todo a los lobeznos. La inaccesibilidad de alimento –los peces habían emigrado a capas más profundas si no desaparecido– dejó sin su dieta preferida a los lobos marinos; las hembras, en particular, invirtieron mucho tiempo y energía buscando alimento, lo que resultó en una menor producción de leche y, con ello, una elevada mortandad entre las crías. Las ballenas (*Balaenoptera* spp.) y el cachalote (*Physeter catodon*) menguaron su número, en el norte peruano, en un 65 por ciento durante la temporada de 1982-1983; el análisis de contenidos estomacales de la ballena de Bryde (*B. brydei*), por citar un ejemplo, mostró que el porcentaje de estómagos vacíos era del 40 por ciento, comparado con el 7 por ciento del año anterior; de ello se desprendía que había bajado drásticamente la oferta alimentaria durante el episodio del Niño.

Aunque El Niño es un fenómeno ecuatorial, el episodio correspondiente a 1982-1983 dejó sentir sus efectos hasta en los ecosistemas polares, donde

se registraron variaciones en la abundancia de krill (*Euphasia superba*). Algo parecido ocurrió con los bosques de *Macrocystis*, género de algas de gran tamaño, de la costa californiana y chilena. En California otros organismos colonizaron los estratos normalmente dominados por *Macrocystis*, que no ocuparía ya sus posiciones habituales, ni siquiera después de la normalización de las condiciones; también en esa zona del Pacífico se observò el cambio sufrido por la anchoveta norteña (*Engraulis mordax*): mostró bajo peso por tamaño, reducido desove y retardo en el crecimiento de juveniles. Por lo que a la costa chilena se refiere, merece destacar la extensa mortandad sufrida por el loco (*Concholepas concholepas*) y la presencia del lobo fino (*Arctocephalus australis*), que por primera vez se registró en el norte de ese país.

En el océano, parte de la materia orgánica producida en la superficie por la fotosíntesis se hunde por efecto de la gravedad. Este proceso forma parte del ciclo global del carbono. Frente a la costa del Perú, durante condiciones frías o normales, cuando se registra una elevada producción primaria, no existe oxígeno suficiente para oxidar toda la materia orgánica que escapa de la superficie. Al acabarse el oxígeno, otros elementos inorgánicos, como el nitrato, donan electrones para la remineralización de la materia orgánica por bacterias. Frente al Perú, el consumo de nitrato es elevado; se supone que puede alcanzarse hasta un 50 por ciento de la desnitrificación global. La desnitrificación tiene un efecto similar al producido por El Niño: ambos reducen la concentración de nutrientes en las aguas afloradas. El incremento de oxígeno durante El Niño limpia el sistema y es, en parte, responsable de los altos niveles de fitoplancton observados después del episodio de 1982-1983. Parejo al alto nivel de fotosíntesis se produce un nivel, asimismo alto, de desnitrificación. A finales del año pasado, la región del Pacífico oriental tropical se aprestaba a recibir nuevas aportaciones de oxígeno, según predecían modelos numéricos creados para simular el comportamiento de los distintos episodios del Niño.

La nueva producción primaria, que equivale, en una primera aproximación, a la cantidad de materia orgánica que escapa de la superficie, se redujo durante 1982-1983 en quinientos millones de toneladas de carbono en la zona ecuatorial. Al mismo tiempo, los satélites han aportado datos que muestran una mayor actividad fotosintética terrestre en el hermisferio Norte, durante el año 1982. Los cambios en los sistemas de convergencia durante el desarrollo del Niño afectan a la producción primaria de los ecosistemas terrestres. Las intensas lluvias caídas en el norte del Perú crearon pastizales en el desierto, lo que pone de relieve la potencial fecundidad de esas regiones si no estuvieran limitadas por la disponibilidad de agua.

Según Robert Bacastow, de la Institución Oceanográfica Scripps, la tasa de acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera varía en los años de Niño. Es necesario investigar los ciclos del carbono para evaluar la incidencia del incremento en la concentración de dióxido de carbono atmosférico, resultante del alto consumo de hidrocarburos. El Niño constituye, pues, un fenómeno natural de gran escala que crea la oportunidad de estudiar algunos procesos inabordables de otra forma.

El Niño nos permite también ampliar nuestros conocimientos sobre la organización de los ecosistemas. El caso de la anchoveta peruana resulta ilustrativo. La pesca intensiva de los años sesenta, junto con la variabilidad ambiental de una década más tarde, provocó una drástica caída de su densidad. El episodio de 1982-1983 afectó notablemente a esa especie, pues desapareció de las capturas en 1983 y 1984. (Datos provisionales de 1985 y 1986 hablan de la recuperación de la anchoveta ante las costas peruanas.)

La ecología moderna está dejando de lado las teorías que consideraban la competencia entre organismos como la fuerza más importante en la estructuración de los ecosistemas, para prestar mayor atención a la influencia del clima y otros factores físicos. Los ecosistemas con alta variedad ambiental no alcanzan nunca la situación de clímax o equilibrio. En el Pacífico oriental tropical, organismos dotados de una alta tasa de crecimiento, las diatomeas entre los componentes del fitoplancton y la anchoveta entre los peces, por ejemplo, parecen mejor adaptados a las condiciones de variabilidad ambiental. Un mejor entendimiento de los efectos que El Niño y el hombre producen en los ecosistemas permitirá un aprovechamiento más racional de los recursos naturales. El Niño ha hecho acto de presencia multitud de veces en el pasado y volverá a ocurrir en el futuro. Conviene que empecemos a aprender a convivir con él y aprovechar las oportunidades que nos ofrece este fenómeno de gran escala.

Computadoras ópticoneuronales

¿Es posible construir ordenadores capaces de resolver problemas que exijan tener registradas en la memoria todas las soluciones? La clave puede consistir en organizaciones de elementos ópticos que remeden a las neuronas del cerebro

Yaser S. Abu-Mostafa y Demetri Psaltis

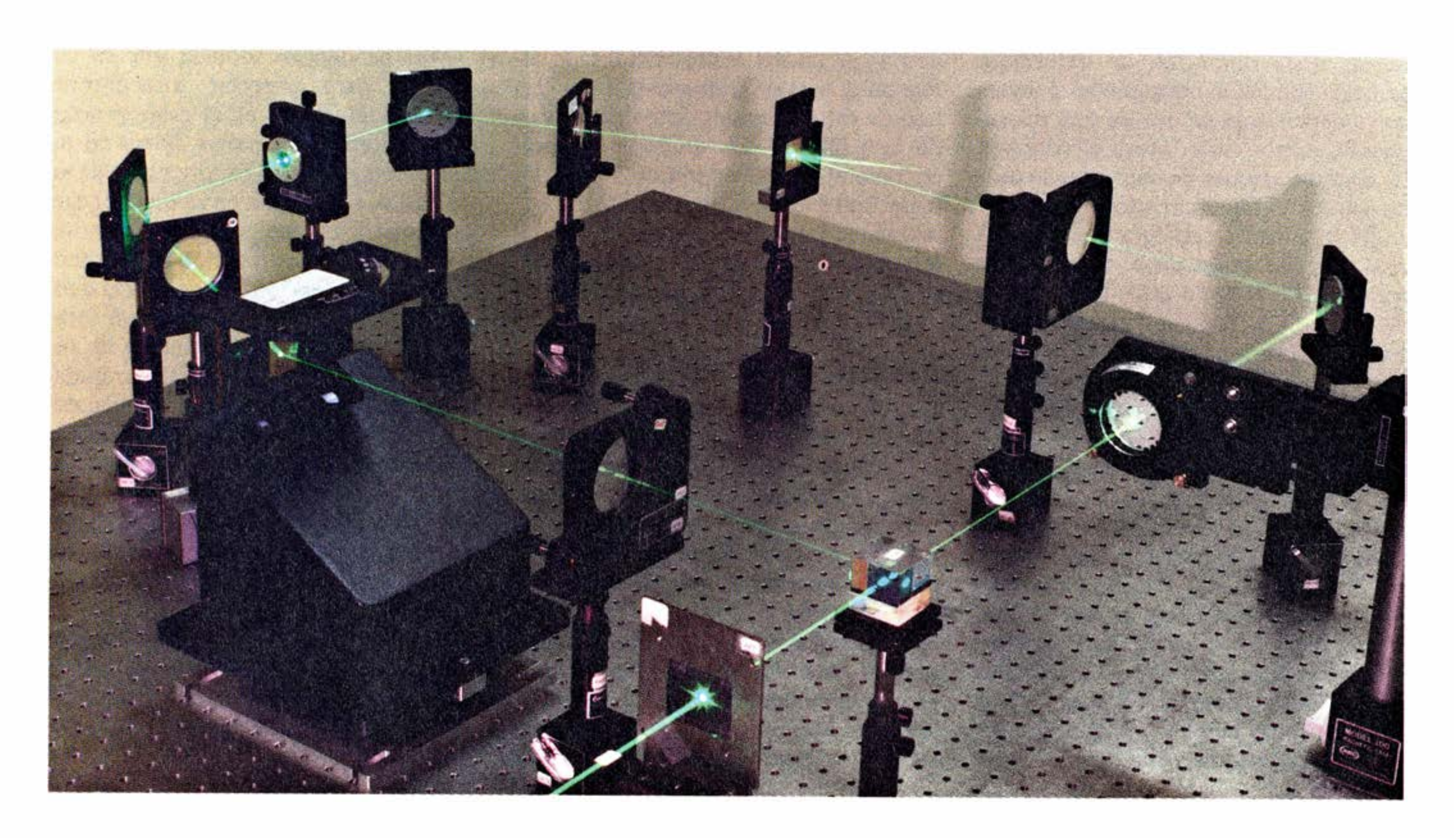
A los investigadores en inteligencia artificial les resulta cada vez más exasperante ver con cuánta facilidad es capaz un niño de tres años de señalar un árbol en una fotografía. En abierto contraste, programas sumamente complejos y perfeccionados, instalados en los más poderosos superordenadores, apenas si logran resultados mediocres al acometer una tarea esencialmente equivalente: el reconocimiento de figuras. Lo paradójico de esta situación es que los ordenadores pueden obtener rápidamente la solución de problemas que desbordarían la capacidad del cerebro humano. Más aún, una simple calculadora de bolsillo supera al cerebro humano en tareas como la de efectuar el producto de dos números de diez cifras. ¿En qué reside la diferencia entre la multiplicación de números y el reconocimiento de objetos, para que cueste tanto lograr la segunda en los ordenadores? Con otras palabras, ¿por qué es tan difícil hacer que un ordenador reconozca un árbol?

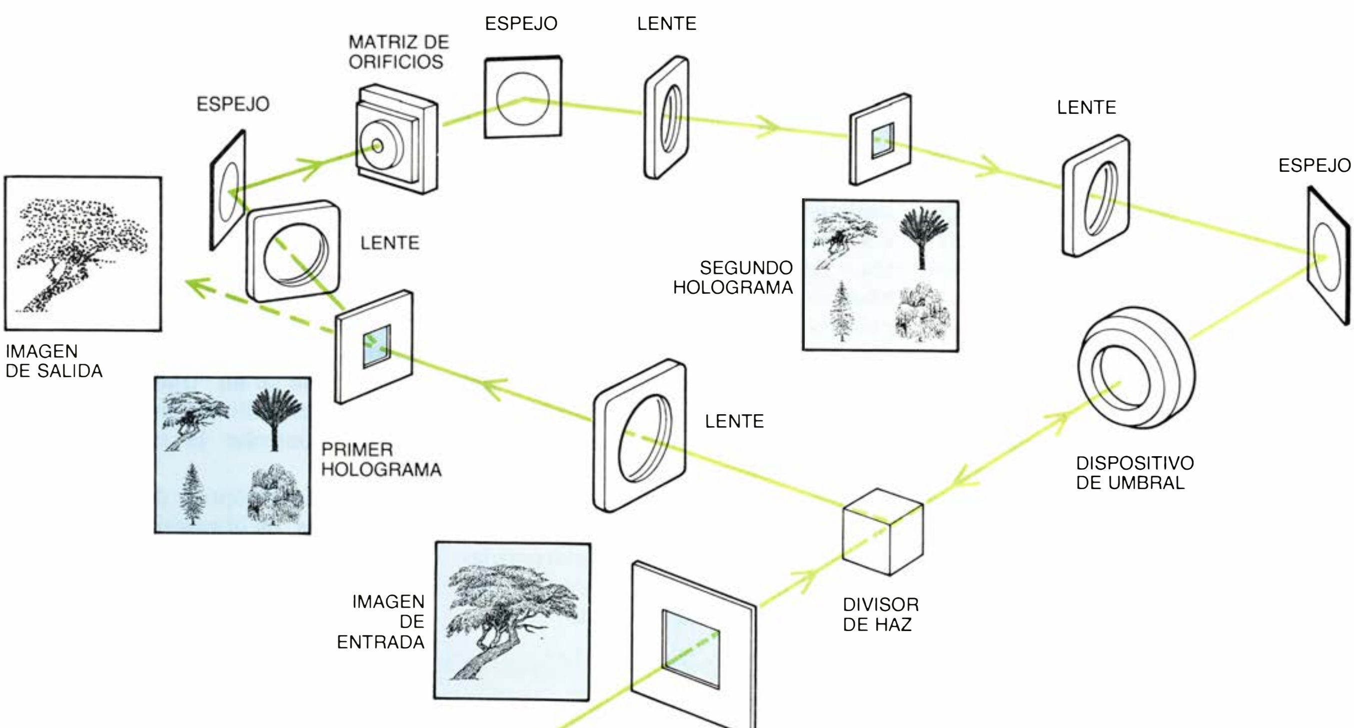
En última instancia, la respuesta a tales cuestiones estriba en que los problemas de identificación de figuras no admiten una definición formal y compacta. Para reconocer árboles se requiere una definición muy amplia de la naturaleza de árbol, que equivaldría a una descripción de todas las variantes concebibles. Los problemas de la clase de los planteados por el reconocimiento de figuras constituyen un subconjunto de los llamados problemas aleatorios, es decir, problemas cuya resolución exige, en esencia, un conocimiento de todos los posibles estados del sistema. Por consiguiente, la resolución de un problema aleatorio comporta tener registrados en la memoria la totalidad de posibles estados, más la facultad de seleccionar rápidamente la más idónea de las soluciones entre el conjunto de las registradas, habida cuenta de los datos disponibles. Por el contrario, la solución de una tarea computacional típica, piénsese en la multiplicación de números, puede quedar sucintamente expresada mediante un algoritmo, o sea, una secuencia de instrucciones perfectamente especificadas, que definan de qué forma han de manipularse los datos para llegar a una solución.

Los ordenadores convencionales son adecuados para ejecutar de manera mecánica las instrucciones de un algoritmo, pero no pueden rivalizar con la capacidad de memorización y recuperación de recuerdos del cerebro humano, que con regularidad y sin esfuerzo va resolviendo y superando los problemas de reconocimiento de formas. Dado que el cerebro es excepcional en lo que toca a capacidad de resolución de problemas aleatorios, son muchos los matemáticos y especialistas en ciencias de cómputo que han examinado más de cerca el funcionamiento del mismo, con la esperanza de que sus principios de operación puedan aplicarse con fruto al diseño de máquinas capaces de resolver problemas de naturaleza aleatoria. Los dispositivos concebidos con la finalidad de proporcionar modelos del funcionamiento cerebral por emulación de su estructura anatómica se denominan computadoras neuronales; lo mismo que el cerebro, habrán de estar compuestas por un gran número de procesadores sencillos ampliamente interconectados. Una tecnología destaca como especialmente prometedora para la construcción de computadoras neuronales: la óptica.

La tecnología óptica se ensambla pulcramente con la noción de computadora neuronal, porque los puntos fuertes de tal tecnología coinciden en las facetas distintivas de una computadora neuronal; entre ellas, la de la interconexión de un gran número de elementos de procesamiento. Sus debilidades se encuentran, en cambio, en zonas menos críticas para el funcionamiento de una computadora neuronal; por ejemplo, su escasa capacidad para efectuar, en el ámbito del procesador, operaciones lógicas intrincadas. Mientras que la tecnología de semiconductores de los ordenadores convencionales ha demostrado su potencia a la hora de dar cuenta de los problemas clásicos de la computación mediante algoritmos, la tecnología óptica de las computadoras neuronales que tenemos en mente tal vez consientan, en su día, la resolución eficiente de problemas aleatorios. De hecho, en nuestro laboratorio del Instituto de Tecnología de California (Caltech), hemos construido con otros colegas sistemas experimentales de reconocimiento de formas que podrían representar un primer paso hacia la computadora neuronal.

Dejando de lado la tecnología con que se haya construido una computadora (óptica o electrónica), así como las funciones que tenga encomendadas ejecutar (multiplicaciones o reconocimiento de formas), dos son las actividades principales que se desarrollan durante la resolución de un problema: operaciones lógicas y de transmisión de datos. Al contemplar los procesos de computación bajo una perspectiva tan fundamental, resulta más fácil precisar los orígenes de los puntos fuertes y débiles de una determinada tecnología informática. Se puede recurrir a la tecnología de semiconductores para fabricar complejos circuitos lógicos a partir de conmutadores electrónicos de tamaño muy pequeño que alcanzan altísimas cotas de fiabilidad. No obstante, tales circuitos integrados tienen bastante limitada la cantidad de datos que pueden transmitir entre sus elementos componentes. La razón es la siguiente: en una micropastilla de silicio las vías de comunicación consisten en hilos metálicos que han de estar separados una distancia crítica cuando menos; de lo contrario, las señales eléctricas de que son portadores se inter-





1. SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE FORMAS (*arriba*) preparado por los autores y sus colegas del Instituto de Tecnología de California. Es capaz de hallar rápidamente la concordancia óptima entre una imagen inicial dada y un conjunto de imágenes holográficas, que representan la memoria del sistema. La imagen inicial es introducida en el sistema proyectándola a través de un divisor del haz (*véase el diagrama*), que es un espejo semirreflectante. Para ello, se ilumina una transparencia (que en este caso contiene la imagen de un ciprés) con un rayo láser (*abajo, a la izquierda*). La luz que atraviesa el divisor del haz incide sobre la superficie frontal de un dispositivo de umbral, el cual la refleja de vuelta hacia el divisor, de donde sale formando un ángulo e inicia el recorrido de un "bucle" óptico. Una lente enfoca la imagen inicial sobre un holograma; en éste, la imagen interactúa con cada una de cuatro imágenes almacenadas holográficamente (imágenes de árboles) y crea determinadas configuraciones luminosas, cuyo brillo depende de lo bien o mal que concuerden las imágenes de entrada y las almacenadas. Una lente y un espejo dirigen la luz que sale del holograma hacia una matriz de finos orificios que separa espacialmente las cuatro configuraciones luminosas correspondientes a las cuatro combinaciones de imagen inicial e imagen almacenada. Una vez colimada la luz por otra lente y otro espejo, se ilumina con ella un segundo holograma. Este holograma contiene almacenado el mismo conjunto de imágenes que el primero, y se halla diseñado para producir una superposición de las cuatro combinaciones de imágenes. El haz portador de las cuatro imágenes superpuestas es enfocado sobre el reverso del dispositivo de umbral mediante un tercer par espejo-lente. El motivo luminoso que incide sobre el reverso del dispositivo de umbral determina qué luz se reflejará de su parte frontal. Dado que la imagen más brillante que llega al dorso del dispositivo de umbral representa la imagen almacenada que mejor concuerda con la imagen de entrada, la luz reflejada por el dispositivo umbral (que describirá una segunda vuelta por el bucle óptico) será esencialmente una imagen de la mejor de las concordancias. Las sucesivas vueltas que se producen a través del bucle siguen reforzando la imagen almacenada que presente mejor concordancia, la cual puede ser finalmente recobrada con el carácter de imagen resultante, que sale del sistema a través del primer holograma del montaje experimental.

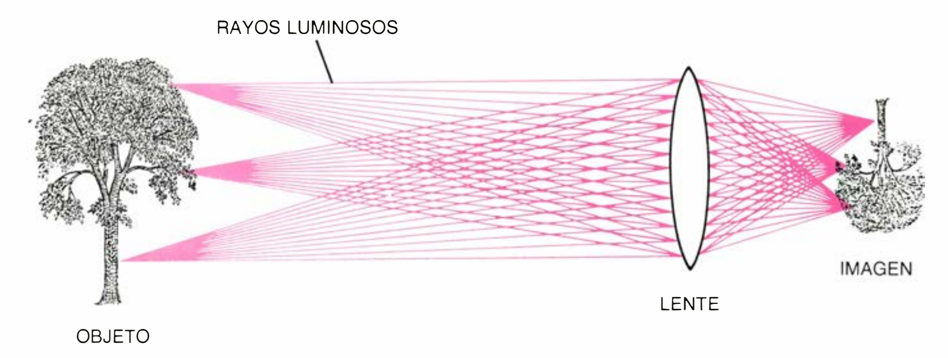
fieren. Esta limitación de naturaleza práctica condiciona el número de líneas que pueden implantarse en una micropastilla y, por ende, acota el volumen de comunicaciones de datos que se produzcan en el microcircuito.

¿Habrá otra tecnología merced a la cual puedan construirse ordenadores que no padezcan de estas limitaciones de capacidad de comunicación de datos? El funcionamiento del cristalino del ojo nos sugiere una posibilidad. El cristalino es una lente que recibe luz de cada uno de los millones de puntos situados del lado de la pupila del iris y la redistribuye sobre millones de células sensoriales de la retina. En este sentido exclusivo, la lente puede interpretarse como un dispositivo de alta capacidad de interconexión: la luz procedente de cada punto de la pupila está "conectada" con cada punto de la imagen enfocada sobre la retina. Además, las lentes y prismas pueden ser simultáneamente atravesados por una multitud de rayos de luz y seguir estos rayos permaneciendo separados. Más todavía, y a diferencia de los hilos portadores de corriente, dos rayos luminosos pueden atravesarse uno al otro sin perturbarse mutuamente. El carácter primario que distingue a la tecnología óptica de la tecnología de semiconductores en sus aplicaciones a la computación estriba en la capacidad de establecer una amplia red de comunicación entre los elementos encargados del procesamiento.

Dado que los elementos de procesamiento óptico se comunican mediante haces de luz, es posible acoplarlos entre sí sin necesidad de enlazarlos a pares por fastidiosos hilos de conexión; por otra parte, no es preciso que estos elementos se encuentren confinados en la superficie de una pastilla de silicio. Hasta tal punto es ello cierto que se está estudiando recurrir a enlaces ópticos para paliar los embotellamientos en las comunicaciones que tienen lugar en los microcircuitos de integración a muy gran escala (VLI). En uno de estos sistemas optoelectrónicos de tipo híbrido, las unidades de procesamiento son electrónicas, pero las conexiones entre ellas son ópticas; trátase de fuentes luminosas y de fotodetectores fabricados en la misma micropastilla que las unidades de procesamiento.

El dispositivo más prometedor para el establecimiento de conexiones ópticas arbitrarias no es la lente, sino el holograma. Debe este último su fama a su empleo como método de generación de imágenes tridimensionales; pero los hologramas representan, con mayor generalidad, una técnica eficaz para registrar y reconstruir la intensidad de un rayo de luz, así como su dirección de procedencia. Mientras que una lente ordinaria aplica cada uno de los rayos luminosos que penetran en la lente en un punto bien determinado del plano de la imagen, los hologramas pueden ser fácilmente "programados" para consentir una multitud de tales aplicaciones.

Un holograma planar producido sobre una película fina (una cinta fotográfica, por ejemplo) puede dirigir cualquier haz luminoso emitido por un punto situado en uno de sus lados hacia cualquier otro punto situado en otro, con tal de que el número total de puntos y de haces luminosos no supere el número de puntos resolubles sobre la película. El número de puntos resolubles de un holograma de unos 2,5 centímetros de lado puede llegar a ser del orden de 100 millones. Tamaña resolución permitiría interconectar 10.000 fuentes luminosas con 10.000 fotodetectores, cada una con todos ellos. Un plan de interconexiones similar mediante hilos de silicio sería extremadamente difícil de lograr sobre una micropastilla de dicho elemento.

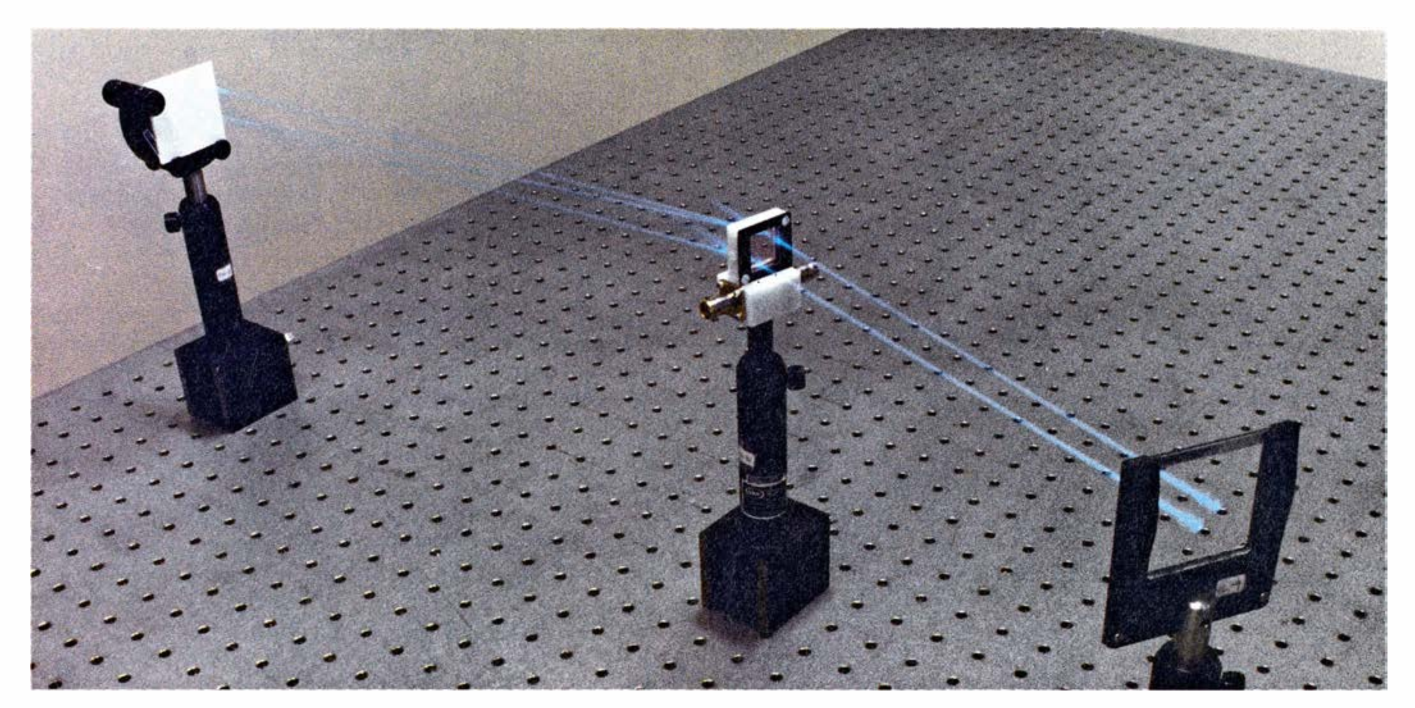


2. LAS LENTES OPTICAS son dispositivos de interconexión intrínsecamente poderosos, pues los rayos de luz que atraviesan una lente conectan cada punto emisor de luz de un objeto con cada punto de la imagen de ese objeto. A diferencia de los hilos tendidos sobre un microcircuito integrado, los rayos de luz pueden acercarse mucho unos a otros sin perturbarse entre sí. Así pues, sería concebible que millones de rayos de luz pudieran transportar simultáneamente datos hasta un dispositivo de procesamiento, mientras que los dispositivos electrónicos se ven limitados a aceptar cada vez entradas a través de unas pocas líneas tan sólo.

Más prodigioso todavía por su capacidad para conectar fotoemisores con fotodetectores es el estéreo-holograma, formado a partir de un cristal fotorrefringente. Al exponer a la luz un tal cristal, se generan en su interior cargas eléctricas que se redisponen de acuerdo con la distribución de la intensidad de iluminación. Dado que la densidad local de carga de un cristal fotorrefringente determina el índice de refracción local (que mide cuán rápidamente viaja la luz a través del material), las imágenes holográficas proyectadas sobre el cristal quedan registradas como variaciones espaciales del índice de refracción. La información relativa a la imagen puede ser extraída después del holograma iluminando el cristal con un haz de luz.

También es posible realizar por medios ópticos otros elementos materiales asociados con la computación tradicional, a saber, elementos de conmutación (mediante los cuales se construyen los procesadores) y elementos de memoria (en los cuales se almacenan datos). Los elementos de conmutación pueden construirse a partir de un material ópticamente no lineal. Se dice que un medio óptico es no lineal cuando sus propiedades de transmitancia, tales como su opacidad o su índice de refracción, cambian al hacerlo el brillo de la luz incidente sobre el medio. El arseniuro de galio es un ejemplo de material óptico no lineal, gracias al cual se han fabricado matrices bidimensionales de conmutadores ópticos. Los materiales ópticamente no lineales posibilitan la construcción de un "transistor óptico", en el cual el brillo de un haz luminoso permite controlar la transmisión de otro haz.

Un elemento óptico de memoria es, en sustancia, un dispositivo capaz de alterar un haz luminoso incidente y conferirle uno de dos estados posibles, correspondientes cada uno a un dígito binario, o bit, de datos binarios (o bien un 1, o bien 0). Se han puesto a punto memorias ópticas para el registro digital de señales de audio o vídeo y, más recientemente, como memorias de masa, para ordenadores electrónicos. No obstante, en estos dispositivos el acceso a la información almacenada se efectúa de ordinario en forma secuencial, enfocando de uno en uno los bits almacenados, de modo muy parecido a la lectura de la información registrada en una cinta magnética. Estos dispositivos no sacan partido del inmenso aumento potencial en la velocidad de lectura de los datos almacenados en la memoria que comportaría el acceso "en paralelo" a tales datos. Sería posible



3. UN ESTEREO-HOLOGRAMA (*pedestal central*) puede distribuir haces de luz láser en direcciones "programables", lo mismo que los hologramas planares registrados en película fotográfica, más conocidos. Aquí, por ejemplo, dos haces de láser procedentes de la parte inferior derecha se convierten en cuatro haces de salida dirigidos hacia el ángulo superior izquierdo. Los estéreo-hologramas se hacen con cristales fotorrefringentes. Al exponer a la luz uno de tales cristales, se generan en su interior cargas eléctricas repartidas de acuerdo con la distribución de intensidades de iluminación. Dado que la densidad local de carga de un cristal fotorrefringente determina el índice de refracción local (que mide la velocidad con que pasa la luz a través del material), el cristal puede registrar imágenes holográficas plasmadas en variaciones espaciales del índice de refracción. Un holograma tal puede definir, para cada una de las imágenes almacenadas en él, una pauta de conexiones ópticas entre fuentes luminosas y detectores. (La fotografía nos la ha proporcionado John Hong, del Caltech.)

leer y transferir de una sola vez millones de bits sin más que iluminar con un haz de luz no enfocada un dispositivo óptico de memoria bien diseñado [*véase la figura 5*].

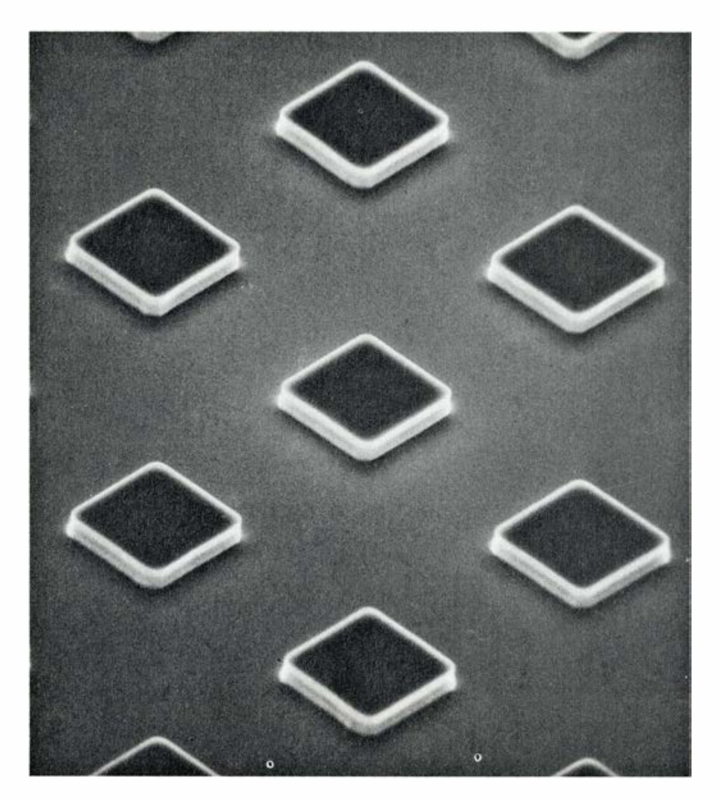
El hecho de que los diseñadores de memorias ópticas no hayan sacado partido del potencial que supondría acceder en paralelo a los datos indica que casi todos los trabajos encaminados al desarrollo de elementos ópticos de conmutación y memoria tienen por meta aplicar tales dispositivos a la ejecución de funciones lógico-binarias de carácter secuencial. Por consiguiente, esos dispositivos ópticos servirán sobre todo para duplicar (si bien de un modo más eficiente) las mismas operaciones desarrolladas en los ordenadores electrónicos de corte tradicional. Aunque tales esfuerzos puedan en última instancia fructificar en más elevadas velocidades de conmutación y en memorias inmensamente mayores, no supondrán cambios fundamentales respecto de los procedimientos de computación de los ordenadores tradicionales. Por consiguiente, resulta igualmente verosímil que los dispositivos que se limiten a remplazar por sus análogos ópticos los elementos electrónicos de conmutación y memorización presenten las mismas insuficiencias que los ordenadores de nuestros días al tener que afrontar problemas de reconocimiento de formas.

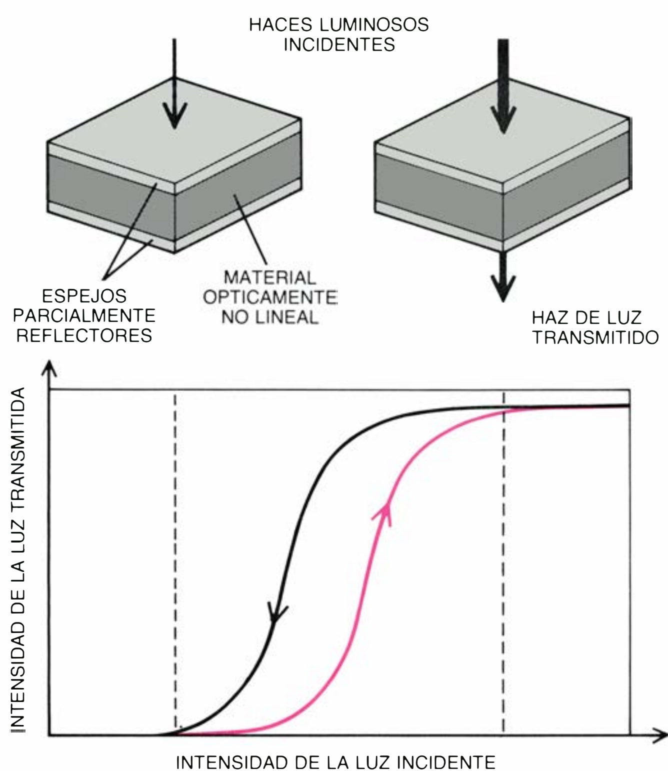
Para comprender por qué es así, conviene examinar cómo procede un ordenador electrónico en la resolución de un problema. Lo hemos indicado ya, la teoría clásica de la computación, de la que nacieron los ordenadores actuales, está construida en torno a la noción de algoritmo. Tenemos un buen ejemplo de algoritmo en el procedimiento enseñado en la escuela para la división de números grandes. El procedimiento es fácil de especificar, y una vez dominado, sea por un ordenador o por un alumno de primaria, admite una aplicación universal: funciona igual de bien al dividir un número de cuatro cifras entre otro de 3, como al dividir un número de 1000 cifras entre otro de 900 (si bien la ejecución del algoritmo puede exigir ahora un poco más de tiempo, especialmente al escolar de primaria).

Los problemas computacionales que se prestan a soluciones algorítmicas comparten todos una propiedad característica: son problemas estructurados, lo que significa que pueden ser enunciados clara y concisamente en términos matemáticos. La inmensa mayoría de los problemas cuya resolución se deja hoy al ordenador pertenecen a esta clase de problemas estructurados, y es hábito universal de los programadores informáticos buscar un algoritmo cada vez que han de resolver un problema.

Sin embargo, problemas como el de reconocimiento de figuras inmersas en ambientes naturales carecen de la estructura que permitiría darles soluciones algorítmicas sencillas. Este alejamiento respecto de las propiedades de los problemas estructurados y de los métodos para resolverlos es lo que caracteriza a los problemas aleatorios. El término aleatorio, relacionado con la noción matemática de azar, es denotativo de la carencia de definición concisa y completa. En este sentido, la aleatoriedad está ligada a la noción matemática de entropía, la cual puede asociarse a la cantidad de desorden de un problema o, equivalentemente, a la cantidad de información necesaria para definirlo. Dado que una descripción formal de un problema aleatorio equivaldría a dar una lista exhaustiva de todas las posibles soluciones del problema, los problemas aleatorios presentan un nivel de entropía muy superior al de los problemas estructurados.

Para mejor comprender el significado de problema aleatorio, volvamos a fijarnos en nuestro ejemplo de reconocer un árbol. Casi todo el mundo cree saber con claridad qué es un árbol, pero le sería muy difícil escribir una definición concisa que le fuera útil a un visitante de otro planeta que no supiera qué son "ramas" u "hojas", ni, puestos a eso, qué es el color "verde". Aun en el caso de que a nuestro hipotético ex-





4. FOTOCONMUTADORES OPTICOS ELEMENTALES (*izquierda*); se fabrican emparedando entre dos espejos parcialmente reflectantes un material ópticamente no-lineal (cuyo índice de refracción varía en función de la intensidad de la luz a que es expuesto). Un elemento así construido (*arriba, a la derecha*) puede cambiar drásticamente sus propiedades de transmisión según la intensidad del haz luminoso incidente. Presenta, además, lo que se denomina "ciclo de histéresis" (*abajo, a la derecha*) durante la conmutación. Inicialmente (*línea de color*), al ir aumentando a partir de 0 la intensidad del haz incidente, el dispositivo no deja pasar nada de luz: la intensidad incidente ha de alcanzar un valor umbral para que comience la transmisión, que sube rápidamente hasta su valor máximo. Pero si la intensidad del haz incidente va reduciéndose hasta 0, la intensidad del haz transmitido no traza el mismo camino que antes. El cambio abrupto de transmisión se produce a una menor intensidad del haz luminoso incidente. (Micrografía de Thirumalai Venkatesan, Bell Communication.)

traterrestre se le mostraran ejemplos de cada una de estas cosas, resultaría que hay una infinidad de tipos de ramas, hojas y matices de verde; es muy improbable que un puñado de ejemplos bastara para dar cuenta de todas las posibles combinaciones arbóreas.

Entre los habitantes de la Tierra, la comprensión universal del significado de "árbol" emana de una vasta acumulación de experiencia común. Lo mismo que el visitante extraterrestre, tampoco un ordenador puede echar mano de este reservorio de experiencia; es preciso enunciarle todo con exactitud y sin ambigüedad. Aunque muchas propiedades de los árboles y de otras escenas visuales exhiben bastante regularidad, existe una componente fundamental de irregularidad que no encaja con ningún modelo matemático o algorítmico sencillo. Cualquier definición generalizada que se funde en regularidades subyacentes a los árboles corre el riesgo de dar cabida a objetos que no son árboles. Más todavía, la única definición que no supondría conocimiento previo alguno de los árboles y que incluiría a todos los árboles y excluiría a todos los demás objetos tendría que equivaler a una descripción de todos los tipos de árboles. Importa advertir que se trata de una dificultad intrínseca de los problemas aleatorios, mucho más que un simple síntoma de imprecisión de pensamiento de los programadores humanos o de una mala elección de las descripciones.

Así pues, un algoritmo sencillo no podrá servir jamás para resolver un problema aleatorio, porque un algoritmo capaz de resolver un problema aleatorio equivaldría a una definición completa del problema, y en consecuencia tendría que alojar las innumerables soluciones posibles de ese problema. Por ejemplo, un algoritmo para identificar huellas dactilares tendría que equivaler a una lista de todas las huellas posibles, y no hay forma de concentrar un tal elenco en unas pocas líneas de programa de ordenador. En definitiva, es preciso clasificar las huellas dactilares en un gran número de tipos fundamentalmente incorrelados, cada uno de los cuales ha de tenerse en cuenta para poder identificar una huella dada. La solución de los problemas aleatorios estriba, fundamentalmente, en poder memorizar la totalidad de las soluciones posibles.

La tecnología óptica ofrece memorias ingentes en potencia, pero, por sí solo, ello no basta para obtener un sistema práctico de resolución de problemas aleatorios. Sería absurdo almacenar ópticamente la enorme base de datos correspondiente a un problema aleatorio y tener luego que explorarla secuencialmente cada vez que se requiera una solución que encaje con los datos de entrada; el tiempo necesario sería prohibitivo. Además, es probable que tanto los datos aportados como la información almacenada resulten incompletos o inexactos, lo que excluye la posibilidad de una perfecta coincidencia entre ellos. El ingrediente clave que posibilite un sistema práctico de resolución de problemas aleatorios ha de ser un procedimiento capaz de asociar directamente los datos aportados con las informaciones almacenadas, sin exigir una coincidencia perfecta.

Tal proceso de asociación constituye uno de los principales rasgos de la memoria biológica, en la cual una serie de características parciales de un objeto provocan la recuperación de información completa acerca de él. Pensemos en el tren de reminiscencias asociadas a un rostro familiar que atraviesan nuestra mente cuando lo vemos: el nombre de la persona, nuestra actitud afectiva respecto de ella; quizás el olor de su colonia o su perfume, por citar nada más unas cuantas. De modo aná-

logo, los seres humanos no obedecen conscientemente y paso a paso a ningún algoritmo para reconocer una escena visual; siguen, por el contrario, un proceso inconsciente de asociación. Incluso en el caso de problemas sumamente estructurados, como ocurre con el ajedrez, los expertos desarrollan destrezas de naturaleza esencialmente asociativa. (En realidad, ha sido la incapacidad de los jugadores expertos para registrar explícitamente el "algoritmo" merced al cual hicieron una jugada brillante lo que hasta ahora ha impedido redactar programas ajedrecísticos capaces de vencer a los maestros de nivel internacional.)

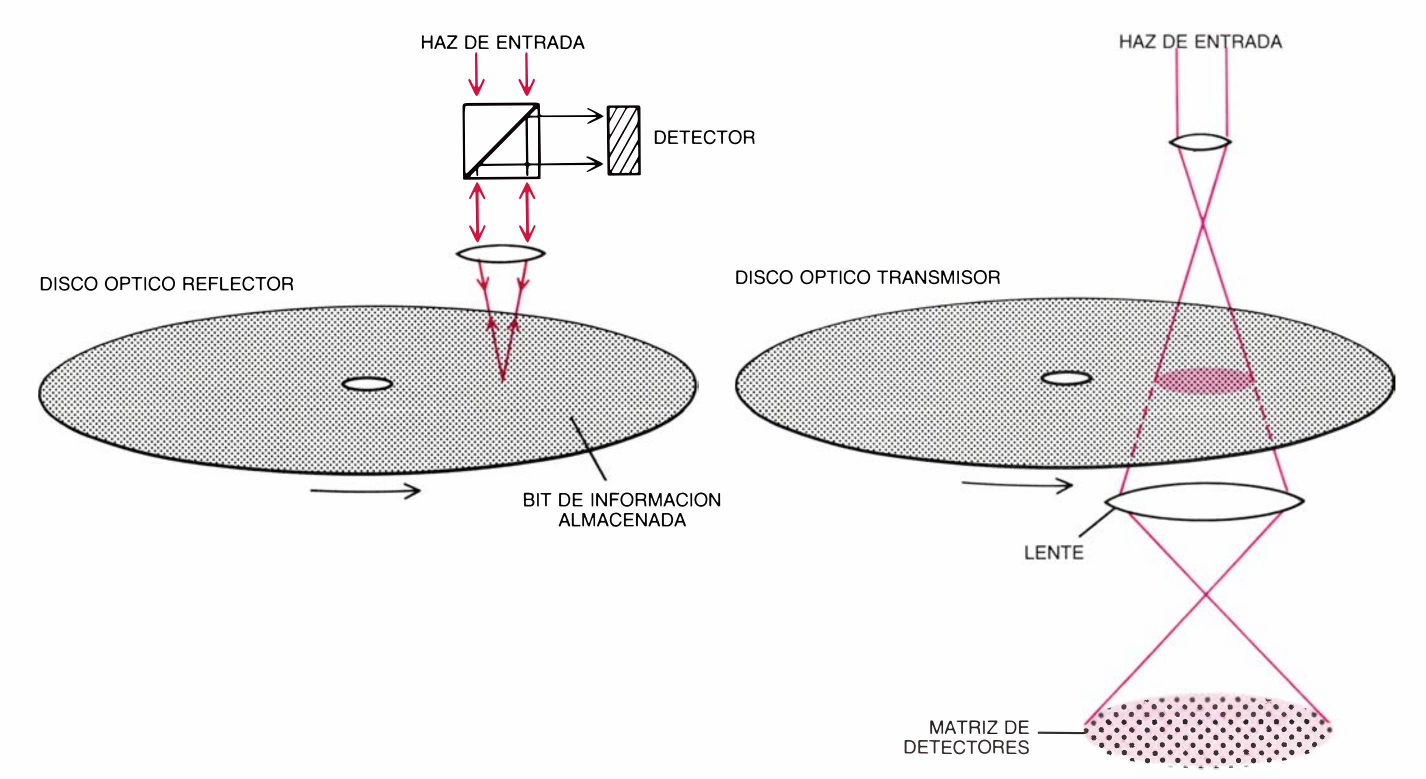
¿Podrá la estructura anatómica del cerebro proporcionar un principio organizativo mediante el cual establecer rápida y fácilmente asociaciones entre lo almacenado en la memoria y los datos aportados como entrada? Más todavía, ¿se podrá llevar a la práctica tal modelo aprovechando las ventajas intrínsecas de la tecnología óptica?

El cerebro está formado por un número elevado de neuronas, cada una de ellas directamente conectada a muchas otras. Las neuronas pueden encontrarse en uno de dos estados (denominados "activo" e "inactivo") y son capaces de percibir, merced a sus conexiones, en qué estado se encuentran sus vecinas. En el transcurso del "cómputo" cerebral, cada neurona va examinando, con independencia de las demás, en qué estado se encuentran sus vecinas; fundada en esa información, determina cuál será su estado futuro. La red nerviosa así formada es robusta; aunque algunas neuronas fallen o funcionen deficientemente, el desarrollo global del sistema no se resiente. (De hecho, en el cerebro están muriendo neuronas continuamente, y a pesar de ello ni el pensamiento ni la memoria sufren mermas serias.) En las redes neuronales la computación es tarea de ejecución colectiva; el funcionamiento sencillo y simultáneo de las neuronas individuales tiene por resultado un complejo y perfeccionado funcionamiento de la red neuronal considerada como un todo.

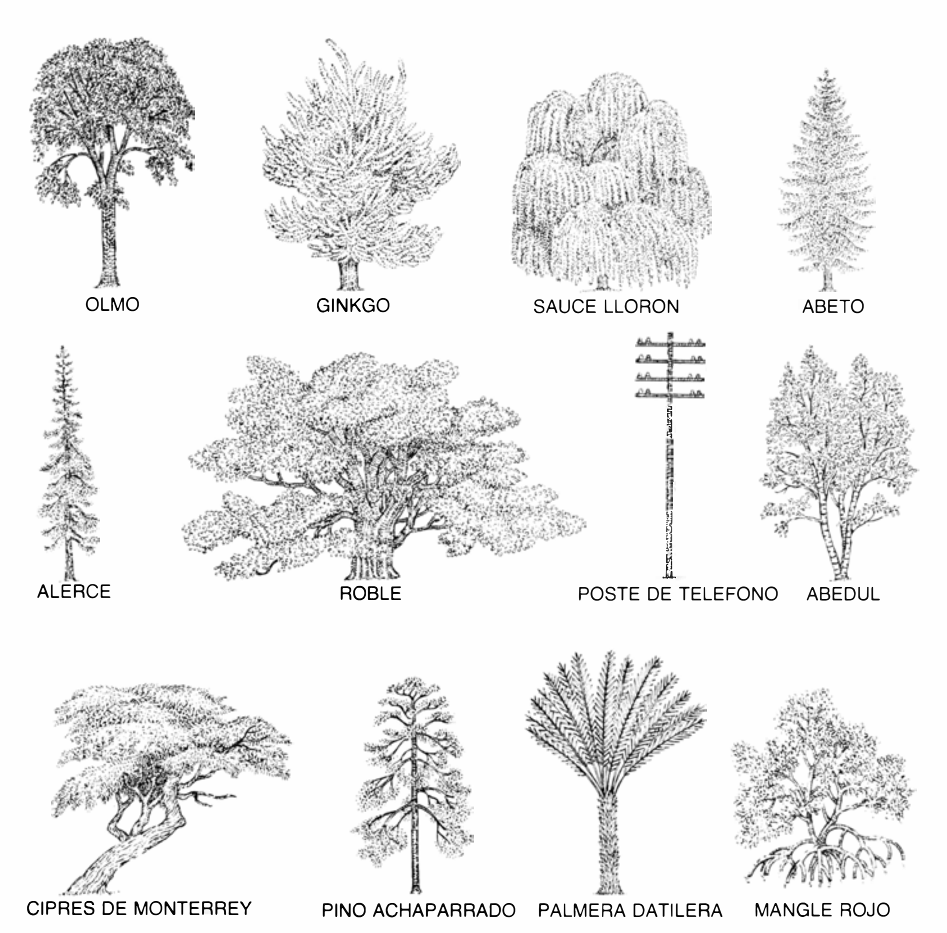
Esta forma de organización permite que millares de neuronas participen simultánea y colectivamente para influir sobre el estado de una neurona particular, obedeciendo a reglas sencillas. Lo que es más importante, permite igualmente codificar información en las conexiones neuronales en lugar de hacerlo en elementos individuales de memoria. Cada fragmento individual de información almacenada puede representarse mediante una única pauta de conexiones entre neuronas.

Los ordenadores cuyos elementos de procesamiento estuvieran dispuestos en organización muy similar a la que presentan las neuronas en el cerebro exhibirían varias características que los harían adecuados para la solución de problemas aleatorios. Para empezar, tales ordenadores serían versátiles, dado que las conexiones entre los elementos (de los que existiría un inmenso número) sirven como mecanismos programables de almacenamiento que únicamente "sintonizan" la memoria del ordenador con un problema dado. En esencia, las conexiones de un ordenador neuronal podrían ser reconfiguradas de grandísimo número de formas para hacer posible el almacenamiento de las muchas posibles soluciones de un problema aleatorio.

Otro de los rasgos fundamentales del funcionamiento de los ordenadores neuronales sería su capacidad para el aprendizaje espontáneo. Imaginemos qué pasaría si fuera preciso enseñar a hablar a los niños de igual modo que se les enseña a dividir, es decir, ¡aprendiendo un sistema de reglas específicas! Por fortuna, en la mayoría de los casos no es preciso hacerlo así, pues los niños asocian espontáneamente el lenguaje hablado con una experiencia. El proceso de aprender a hablar comienza, por consiguiente, remedando las palabras oídas en asociación con una experiencia particular. De esta forma sencilla es como el niño comienza a producir pautas verbales reconocibles y lógicas.



5. DISPOSITIVOS OPTICOS de memoria. Consisten en discos provistos de puntos capaces de modular la luz en dos posibles estados. Los estados corresponden al valor de un bit almacenado de datos binarios (sea 1 o un 0). En la mayoría de los diseños actuales (*a la izquierda*), el acceso a la información se efectúa secuencialmente, enfocando un haz luminoso sobre cada punto que almacena datos y detectando la señal reflejada. Un dispositivo similar que se valiese de un haz no enfocado para explorar un disco por detección de la luz transmitida a su través (*a la derecha*) podría aumentar enormemente la velocidad de acceso a los datos, pues podría examinar millones de puntos cada vez, leyendo y transmitiendo simultáneamente los datos a una matriz de elementos detectores.



6. ¿SON ARBOLES TODOS ESTOS OBJETOS? Hasta un niño pequeño respondería correctamente que no. Por contra, las dificultades con que tropieza un ordenador convencional son enormes. A pesar de existir una clara regularidad entre los árboles mostrados (por ejemplo, todos tienen tronco y ramas), existe también una fuerte componente de irregularidad arbórea entre ellos. Una definición general de árbol que se fundase en la regularidad subyacente podría provocar errores de identificación (como el confundir con árboles los postes de teléfono, que tienen "tronco" y "ramas"). Por consiguiente, un programa concebido con el propósito de identificar árboles tendría que consistir, en esencia, en una lista de todos los tipos de árboles, imposible de conseguir en unas pocas líneas de programa. (La recreación gráfica es de Patricia J. Wynne.)

De manera similar, el programador de una computadora neuronal no tiene necesidad de comprender en sentido matemático formal el problema que se encuentra programando. Lo único que debe hacer es proporcionar al ordenador suficientes datos (consistentes en posibles soluciones) que sirvan para "enseñarle", y dejarle establecer para cada solución una única configuración de conexiones. Dicho con otras palabras, es posible que un ordenador neuronal se programe a sí mismo. Por ejemplo, si se quisiera programar un ordenador neuronal con el propósito de que reconociera distintos tipos de árboles, lo que haríamos sería proporcionarle imágenes de árboles para "enseñarle" y dejar que se estableciera una pauta específica de interconexiones, una "impronta", para cada una de las imágenes que le han sido enseñadas.

Una computadora neuronal construida con elementos ópticos que obedeciera a estos principios constaría de dos elementos principales. El primer componente es una matriz bidimensional de elementos de conmutación óptica, encargados de la simulación de las neuronas; los elementos cambian de uno a otro estado dependiendo del estado de los elementos a los que se encuentren conectados. Cada elemento de la matriz planar puede estar interconectado por medio de haces luminosos con todas las demás neuronas. La segunda componente es un holograma que especifique las interconexiones entre los elementos. Dado que las interconexiones constituyen la memoria, si se pretende resolver distintos problemas mediante una misma computadora neuronal óptica es preciso que sean modificables.

La matriz de elementos de conmutación puede crearse por métodos de fabricación perfectamente experimentados y utilizados de materia rutinaria con materiales semiconductores. Cada elemento tanto puede ser un conmutador puramente óptico como una combinación optoelectrónica de fotodetector, conmutador electrónico y fotoemisor. El número total de posibles conexiones es igual al cuadrado del número de elementos. Si se utiliza un holograma volumétrico para especificar el esquema de interconexión, el volumen del cristal tiene que ser proporcional al número total de conexiones.

Un holograma cuyo volumen sea de 1 centímetro cúbico puede servir en principio para especificar más de un billón (10^{12}) de conexiones, lo que equivale a decir que es capaz de gestionar todos los posibles esquemas de interconexión de más de un millón de elementos ópticos. La capacidad de almacenar la información sobre interconexiones que consienten las tres dimensiones de un holograma espacial crea una memoria potencial inmensa para los ordenadores ópticoneuronales. Por ejemplo, en el caso de los hologramas utilizados para sistemas de reconocimiento de formas, el diagrama de interconexiones puede establecerse fácilmente creando un holograma de todas las imágenes a identificar.

Tenemos en nuestro laboratorio del Caltech varios experimentos en marcha, tendentes a poner a punto tales computadoras ópticoneuronales. En uno de estos montajes, la acción de más de 10.000 neuronas es simulada mediante un dispositivo umbral consistente en 10.000 diminutos elementos en los que la reflectividad de su superficie frontal cambia de estado en cuanto la intensidad de un rayo de luz que incide en su superficie posterior rebasa cierto valor umbral. En este sentido, los elementos de umbral actúan a modo de neuronas, dado que cambian de estado dependiendo de que les llegue por detrás una intensidad luminosa suficiente. Un par de hologramas planares, un sistema de lentes y espejos y una matriz de finos orificios permiten especificar cuánta luz recibe cada elemento umbral, estableciendo en esencia las interconexiones entre los elementos. Aunque ambos hologramas contienen el mismo conjunto de imágenes, los bordes de las imágenes encerradas en uno de los hologramas se han ampliado. El sistema está organizado en forma de "bucle" óptico, con lo que el sistema tiene una continua realimentación.

Las imágenes a reconocer se proyectan en el sistema haciéndolas reflejarse sobre la superficie frontal del dispositivo de umbral. Mediante lentes, espejos y un entramado de orificios se hace interactuar la imagen de entrada así reflejada con todas las imágenes almacenadas en los dos hologramas, de modo tal que la imagen almacenada que mejor coincida con la imagen de entrada sea la imagen más brillante emanada del segundo holograma. La

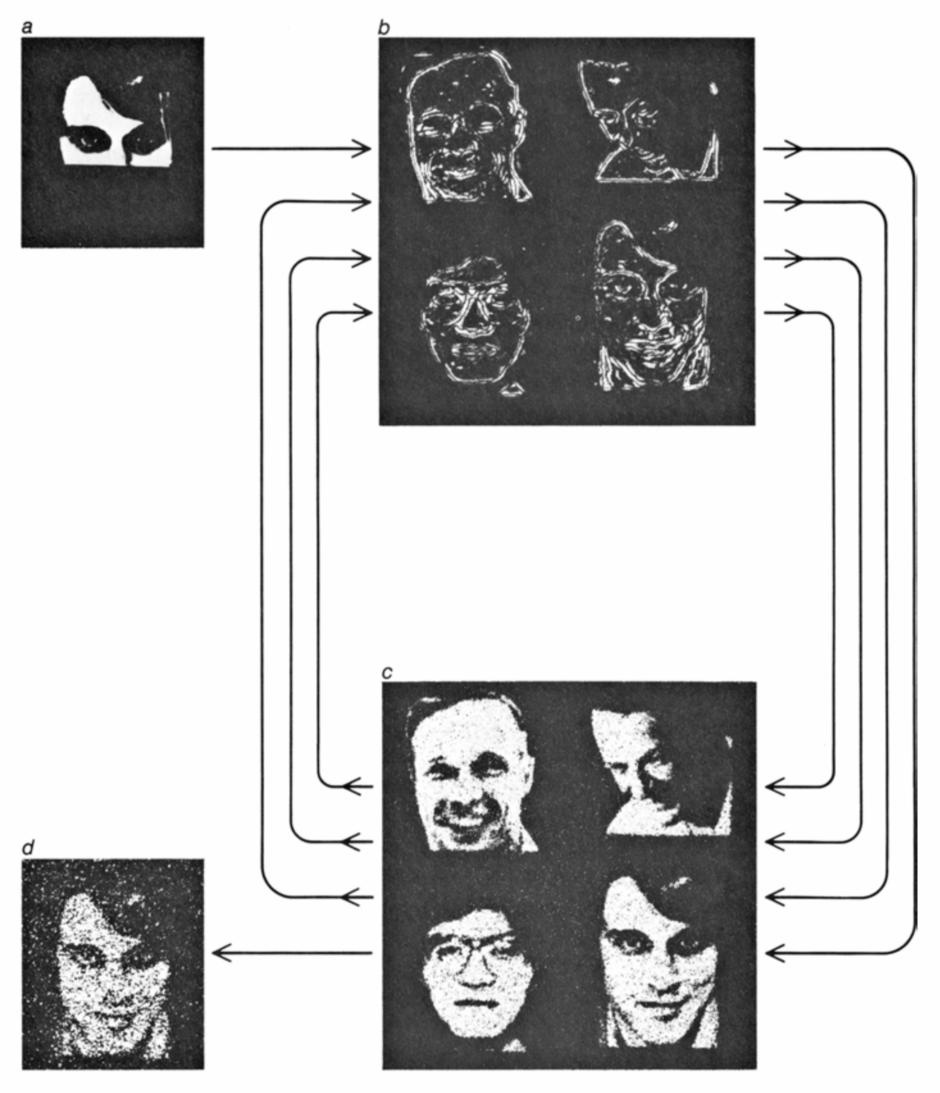
luz procedente del segundo holograma es dirigida entonces hacia la superficie trasera del dispositivo de umbral, haciendo que los distintos elementos de umbral cambien su reflectancia, de modo que sea una imagen de la coincidencia más perfecta lo que primariamente se refleje de la superficie frontal del dispositivo, que da entonces una segunda pasada por el bucle. Las sucesivas pasadas en torno al bucle continúan reforzando la imagen que mejor encaja, hasta que el sistema se "fija" en la configuración almacenada correcta, que puede seguidamente ser recobrada como imagen de salida. De este modo el sistema es capaz de reconocer una cualquiera de las imágenes almacenadas, a pesar incluso de que sólo se proyecte en el interior del sistema parte de la imagen.

Estamos convencidos de que el mejor procedimiento para diseñar computadoras que resuelvan problemas aleatorios será llevar a la práctica el sistema de "arquitectura neuronal". La tecnología óptica puede aplicarse admirablemente bien a la construcción de un tal ordenador. Un ordenador neuronal precisa de un número ingente de conmutadores, cada uno de los cuales ha de realizar sólo una operación sencilla para conmutar entre dos estados. Análogamente, es posible situar sobre un plano un gran número de elementos de conmutación óptica. Un ordenador neuronal requiere una extensa red de enlace y comunicación de datos. A su vez, los hologramas pueden establecer las conexiones necesarias entre numerosos elementos ópticos. Dado que los rayos de luz pueden atravesarse unos a otros sin interferirse y no están limitados a viajar a lo largo de las dos dimensiones de la superficie de una micropastilla de silicio, se puede conseguir sin dificultad una rápida comunicación simultánea entre numerosos elementos ópticos.

Si bien es cierto que los sistemas ópticos son vulnerables a diversas inexactitudes y errores locales, las computadoras neuronales poseen una tolerancia intrínseca con los fallos; no es necesaria una concordancia perfecta entre la entrada y la salida. La programación de una computadora neuronal se efectuaría estableciendo para cada solución una única configuración de interconexiones, lo que podría llevarse a cabo fácilmente registrando diversas imágenes sobre un cristal fotorrefringente o sobre un holograma fotográfico, que sirvieran para "enseñarle". En contraste con los ordenadores convencionales, la velocidad de conmutación de cada elemento no desempeña un papel crítico en el funcionamiento de los ordenadores neuronales, dado que de ordinario bastan unas pocas iteraciones para dejar terminada la función de asociación. Esta propiedad es particularmente feliz para las computadoras ópticoneuronales, pues la excitación de cada "neurona" consume una cantidad fija de energía, y la aceleración del proceso se traduce en un mayor consumo de potencia y, por consiguiente, en una producción excesiva de calor.

Como es obvio, son muchas las dificultades que habrá que vencer antes de que el soporte físico (*hardware*) óptico, organizado en arquitectura neuronal, pueda producir ordenadores prácticos capaces de tratar problemas aleatorios. Se precisa avanzar en el desarrollo de materiales ópticos y en sus tecnologías de fabricación, lo mismo que en la comprensión de las computadoras neuronales de gran escala. No menos importante es profundizar en el conocimiento del funcionamiento de las neuronas y de cómo "aprenden" y "clasifican" formas y configuraciones.

En ingeniería, ciencias de la computación y matemática se han alcanzado hitos importantes en tres campos que se dirían sin relación mutua: componentes ópticos, computadoras neuronales y problemas aleatorios. Existen buenas razones para creer que conforme se progrese en cada uno de estos campos, su interacción acabará produciendo sistemas capaces de reconocer formas y de ejecutar otras tareas de interés en inteligencia artificial, que nunca será posible duplicar por medios puramente electrónicos.



7. MEMORIA ASOCIATIVA, una de las características del sistema óptico de reconocimiento de figuras ideado por los autores (*véase la figura 1*): el sistema es capaz de "reconocer" una imagen, aun cuando sólo se proyecte parte de ella sobre el sistema. El sistema es capaz de seleccionar la imagen completa correcta (*d*) suministrándole simplemente la mitad (*a*) de una de las cuatro caras que tiene almacenadas en un par de hologramas, que contienen respectivamente imágenes de bordes ampliados (*b*) e imágenes normales (*c*). Uno de los rasgos característicos de la memoria y el aprendizaje humanos es justamente un proceso similar, en el cual un fragmento de información educe la rememoración. Aunque en este ejemplo solamente se registraron en fotografía holográfica cuatro imágenes, es concebible que un estéreo-holograma, cuya capacidad de almacenamiento es enorme, posibilitara la memorización y rápida recordación de millones de imágenes.

La rotura de los continentes

Empieza sobre una zona caliente del manto. Roca fundida ascendente se emplaza bajo la corteza continental y la debilita, horadándola en diversos puntos hasta partirla en dos: así nacen los océanos

Enrico Bonatti

Desde que, hace unos 20 años, la teoría de la deriva continental alcanzó aceptación general, a los investigadores viene preocupándoles en particular una cuestión: ¿cómo se parten los continentes y se forma un océano en el vano, cada vez mayor, de la fractura? El problema es más complejo de lo que aparenta. La litosfera –la capa exterior rígida de la tierra, que comprende la corteza y parte del manto superior– no es igual bajo los océanos que bajo los continentes. Mientras que la litosfera continental suele medir entre 100 y 150 kilómetros de grosor, el espesor de la litosfera oceánica, que aumenta con su edad, va de menos de 10 a no más de 100 kilómetros. En particular, la corteza continental es más gruesa que la oceánica y, además, menos densa: está formada principalmente por rocas graníticas, ricas en silicio y aluminio y de densidad relativamente baja, 2,7 gramos por centímetro cúbico. Por el contrario, la corteza oceánica consta básicamente de rocas ricas en hierro y magnesio de composición basáltica y de unos 2,9 gramos por centímetro cúbico de densidad. Cuando la litosfera continental se parte en dos placas, la litosfera gruesa ha de convertirse en litosfera delgada; el granito ha de dejar paso al basalto. ¿Cuáles son los procesos físicos y químicos implicados en esos cambios?

Ningún lugar permite mejor el estudio de esos problemas que la región de Africa oriental y Arabia, donde se hallan algunos de los mayores valles de fractura, o rifts, del planeta. Los grandes valles que se extienden desde Mozambique y Zambia hacia el norte, hasta Etiopía, constituyen lo que se denomina un sistema continental de rift, en el que la rotura de la litosfera continental aún no se ha completado. El golfo de Adén, en cambio, es un rift oceánico: los bloques continentales de Arabia y Africa llevan divergiendo más de 10 millones de años, en el transcurso de los cuales ha manado, del manto subyacente, magma caliente, que ha formado la corteza oceánica que separa los bloques. En el mar Rojo se está produciendo ahora mismo la transición de un rift continental a otro oceánico.

Parece plausible que esos tres valles de fractura representen diferentes estadios de una única secuencia evolutiva. En otras palabras, el golfo de Adén evolucionó a partir de un rift del tipo del mar Rojo, que a su vez es fruto de un sistema continental de rift comparable al de Africa oriental. El océano Atlántico, un valle de fractura maduro que durante más de 100 millones de años ha evolucionado a partir de una situación parecida a las que dominan hoy en el mar Rojo y el golfo de Adén, constituye un estadio más avanzado de esa secuencia hipotética. Así, parte de la importancia geológica de los jóvenes valles de fractura de Africa oriental y Arabia reside en que su estudio puede facilitar la interpretación de cómo Europa y Africa empezaron a separarse de las Américas.

En ese proceso de rotura resulta indiscutible la implicación íntima del manto superior. Los estudios sísmicos han revelado que, inmediatamente debajo de la litosfera, el manto presenta una zona por donde las ondas acústicas (desencadenadas por terremotos o fruto de explosiones artificiales) se propagan más lentamente que por la litosfera. La zona de baja velocidad, llamada astenosfera, debe estar constituida por material más caliente que la litosfera; el material más caliente es más débil y menos rígido, y por tanto transmite peor las ondas acústicas. Las investigaciones sísmicas han demostrado que bajo un gran valle de fractura continental, como el de Africa oriental, el de río Grande, en el oeste de los Estados Unidos, o el del Baikal, en la Unión Soviética, el límite térmico entre la litosfera y la astenosfera asciende abruptamente; es decir, la litosfera mengua y la astenosfera sube. Bajo el rift de Africa oriental, por ejemplo, el límite queda a una profundidad de sólo 30 o 50 kilómetros, mientras que en el resto de Africa la litosfera presenta entre 100 y 150 kilómetros de grosor.

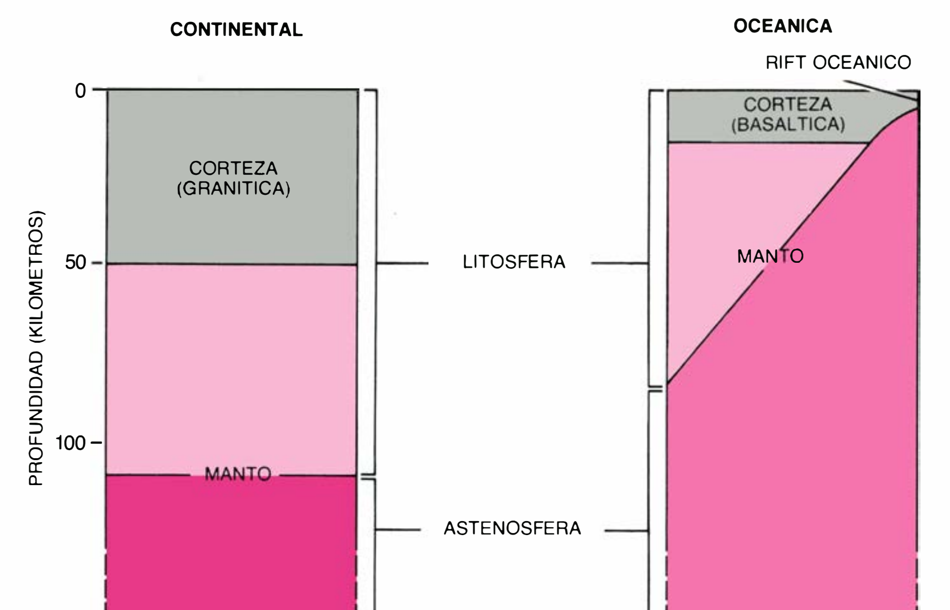
Todo ello lo interpretan de modo diferente dos corrientes teóricas, que defienden posturas distintas sobre la causa de la rotura. Algunos investigadores creen que la fragmentación empieza en la litosfera, cuando los esfuerzos resultantes de los movimientos horizontales de las placas litosféricas tensan una de las placas hasta el punto de rotura. Según ese enfoque, la astenosfera es esencialmente pasiva: se limita a subir y rellenar el hueco dejado por la litosfera menguante.

La otra escuela sostiene, por el contrario, que el proceso de ruptura se inicia en la astenosfera con el establecimiento de una anomalía térmica –un punto, o línea, caliente– donde la temperatura es más elevada que en cualquier otro lugar, a esa misma profundidad [véase "Los puntos calientes de la Tierra", por Gregory E. Vink, W. Jason Morgan y Peter R. Vogt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1985]. Puesto que su temperatura es anómalamente alta, la roca del manto que subyace a un valle de fractura naciente asciende, abovedando, y por consiguiente tensando, la litosfera continental que le cubre. A su vez, el calor reduce la resistencia de la litosfera. Por último, la parte superior de la litosfera debilitada se agrieta a lo largo de fallas de extensión, lo que provoca el hundimiento de bloques de corteza. Aparece así un conjunto de fosas tectónicas, o grabens; es decir, valles de fractura, como los de Africa oriental.

Hasta cierto punto, la pregunta de qué es primero, si el estiramiento de la litosfera o el ascenso de la astenosfera, viene a ser como la del huevo y la ga-



1. EVOLUCION DE UN RIFT, reflejada en la composición química de las rocas del manto terrestre que afloran en la superficie. La micrografía muestra un grano de espinela (*pardo oscuro*), un componente mineral menor de la peridotita, la roca predominante en el manto. El grano, de medio milímetro de diámetro, se encuentra incluido en un piroxeno, uno de los minerales principales de la peridotita. La razón cromo/aluminio en la espinela aumenta a medida que el rift (o valle de fractura) evoluciona del estadio continental al oceánico. Ello sugiere que el grado de fusión de peridotitas del manto situado bajo el rift aumenta con el tiempo; la fusión tiende a extraer más aluminio que cromo de la espinela. El incremento quizá responda a la intensificación de una anomalía térmica.



2. LITOSFERA CONTINENTAL Y LITOSFERA OCEANICA, que difieren en grosor y composición. La litosfera incluye la corteza y parte del manto superior. Se encuentra dividida en placas rígidas, que se desplazan sobre la astenosfera subyacente, una capa del manto más caliente y blanda que la litosfera. La litosfera continental mide de 100 a 150 kilómetros de grosor; la litosfera oceánica nunca rebasa los 100 kilómetros de grosor y, en los valles de fractura oceánicos, donde se crea por ascenso de la astenosfera, el grosor no llega a 10 kilómetros. La corteza continental es principalmente granítica rica en silicio y aluminio; la oceánica, rica en hierro y magnesio, consta de basaltos y gabros, ambos formados a partir de magma basáltico.

llina. En la escala geológica del tiempo, ambos procesos ocurren más o menos simultáneamente. Sin embargo, los trabajos que estoy realizando con mi colega Monique Seyler en el Observatorio Geológico Lamont-Doherty, de la Universidad de Columbia, parecen subrayar que el ascenso del manto es la causa última de la fracturación.

Nuestra investigación se ha centrado en determinar qué le ocurre a la roca del manto que asciende bajo un rift. Puesto que la presión en el interior de la tierra aumenta con la profundidad, al ascender, el material caliente que subyace a un rift irá quedando sometido a presiones cada vez menores. Tal disminución de la presión, sin descenso significativo de la temperatura, posiblemente determine la fusión de parte del material. La roca fundida, o magma, se separa de la fracción no fundida de la roca madre y sigue ascendiendo. En última instancia aparecerá en superficie por erupción volcánica o se enfriará y solidificará lentamente en cámaras de magma situadas en la corteza o debajo de ella, formando intrusiones de rocas ígneas.

La isla de Zabargad presenta indicios de que bajo el rift del mar Rojo se ha dado el segundo proceso. La isla entera está formada por bloques de manto superior y corteza inferior que durante el proceso de rotura se elevaron (no se sabe exactamente cómo) y afloraron en la superficie. Entre los bloques expuestos hay peridotitas: rocas densas (de 3, 3 gramos por centímetro cúbico) que constituyen la mayor parte del manto superior y cuyos componentes minerales principales son silicatos de hierro y magnesio, como el olivino y los piroxenos. En contacto con la peridotita aparece una sección de gneis granulítico, roca granítica característica de la parte inferior de la corteza continental. La asociación de peridotita procedente del manto y gneis granulítico sugiere que Zabargad es, en efecto, un recurso inhabitual, un lugar donde se pueden contemplar pedazos del límite entre la corteza y el manto.

La observación minuciosa revela datos importantes sobre el inicio de la ruptura en el mar Rojo. Los gneises de Zabargad están entremezclados con gabros: rocas ígneas de grano grueso formadas a partir de magmas basálticos que se enfriaron lentamente en profundidad. (Cuando ese mismo magma llega a la superficie y se enfría rápidamente produce basalto de grano fino.) Experimentos de laboratorio han demostrado que los magmas basálticos –y por consiguiente los gabros y los basaltos– resultan de la fusión parcial de peridotita en el manto superior.

Del examen de los rasgos mineralógicos y químicos de un gabro, en particular del análisis de la composición elemental de los piroxenos que lo forman, se puede deducir la profundidad a la que se enfrió y cristalizó. Los gabros de Zabargad cristalizaron por lo menos a 30 kilómetros bajo la superficie de la corteza. Los gneises intercalados deben proceder de la misma profundidad, puesto que contienen granate, un mineral que cristaliza sólo a gran presión. Dado que la corteza continental de las inmediaciones del mar Rojo alcanza de 30 a 45 kilómetros de grosor, el complejo de gabro y gneis de Zabargad debió generarse por inyección de magmas basálticos en la base de la corteza antes de que se registraran roturas o adelgazamientos importantes de la misma.

Ello significa que el ascenso de la astenosfera debió preceder al adelgazamiento de la corteza. Ciertamente, los gneises y gabros atestiguan el proceso de adelgazamiento. Su estructura mineral y composición química indican que tras su cristalización experimentaron cambios y recristalizaciones metamórficos en condiciones de presión gradualmente decreciente. En otras palabras, fueron ascendiendo a medida que la corteza continental se estiraba y adelgazaba.

En otras islas del mar Rojo mis colegas y yo hemos encontrado gabros que inicialmente cristalizaron a menos de 10 kilómetros de profundidad. Según parece, durante el período de estiramiento y adelgazamiento de la corteza, se emplazaron magmas basálticos bajo la misma. De ahí que por debajo de la corteza continental del mar Rojo, desde la corteza gruesa y apenas estirada de sus orillas hasta la delgada corteza que queda junto al eje del rift, se extienda una capa más o menos continua de gabros. Un emplazamiento análogo se está produciendo hoy bajo el rift de Africa oriental; varios investigadores, en especial R. C. Searle, del Instituto Británico de Oceanografía, han obtenido pruebas sísmicas de la existencia, en los valles de fractura, de una capa de gabro bajo la corteza. (Los gabros presentan una velocidad sísmica característica.)

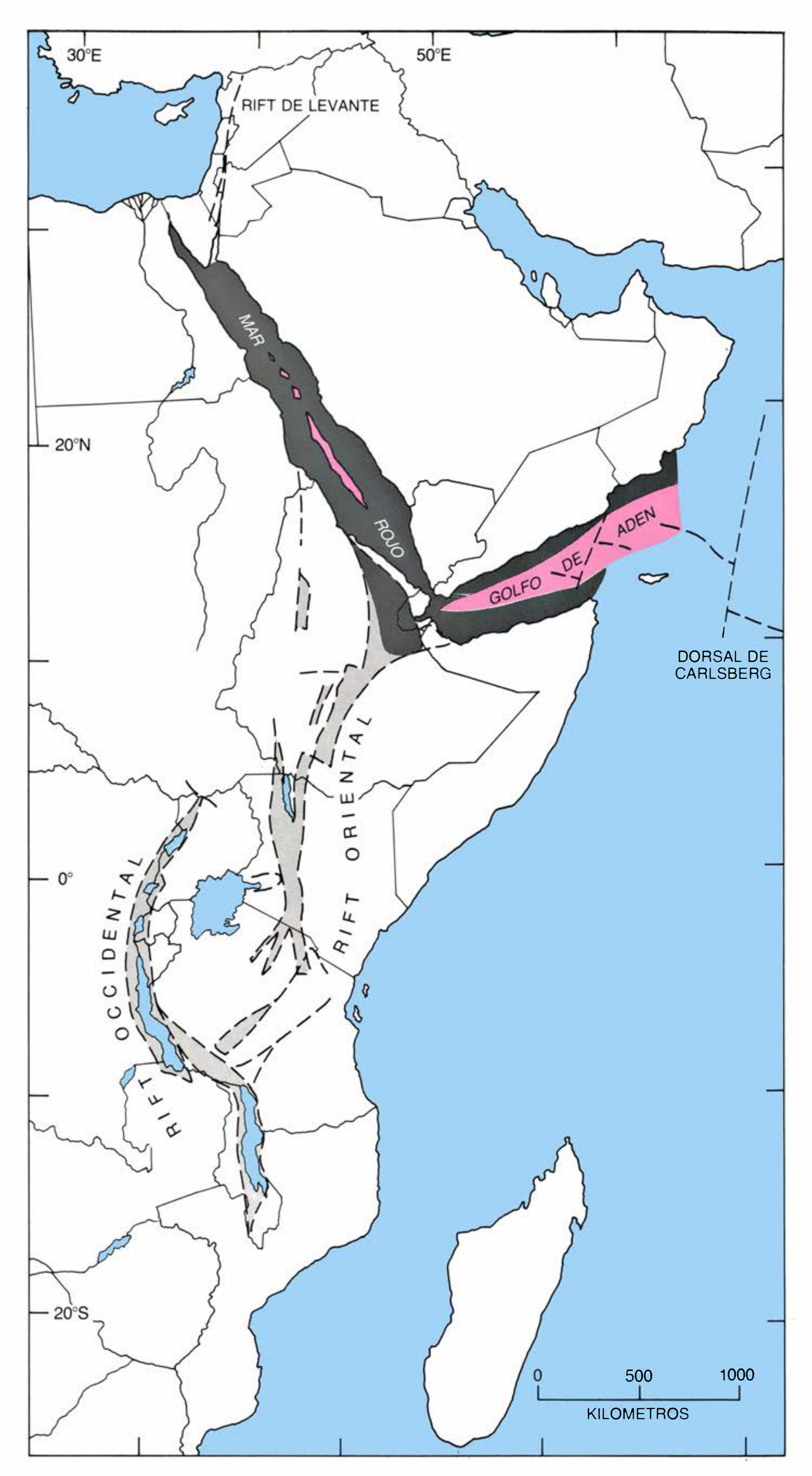
Cabe resaltar que la formación del rift atlántico también parece haber empezado con ese tipo de emplazamiento. Los perfiles sísmicos de la corteza trazados frente a la costa oriental de Norteamérica (obtenidos por un grupo formado por científicos de distintos centros de Estados Unidos y Canadá e integrados en el Experimento Sísmico de Gran Apertura) indican que una capa de rocas gabroides subyace a toda la plataforma continental. En tierra, la capa de gabro buza hacia el interior, probablemente hasta la base de la gruesa corteza continental, igual que la

correspondiente capa del mar Rojo. Mar adentro, donde la corteza continental se adelgaza y finalmente se sustituye por corteza oceánica, la capa de gabro asciende a profundidades progresivamente más someras. Así, la rotura que separó Europa de Norteamérica, ocurrida hace entre 170 y 100 millones de años, parece haberse acompañado del mismo ascenso de magma basáltico que hoy cursa bajo los valles de fractura de Africa oriental y el mar Rojo.

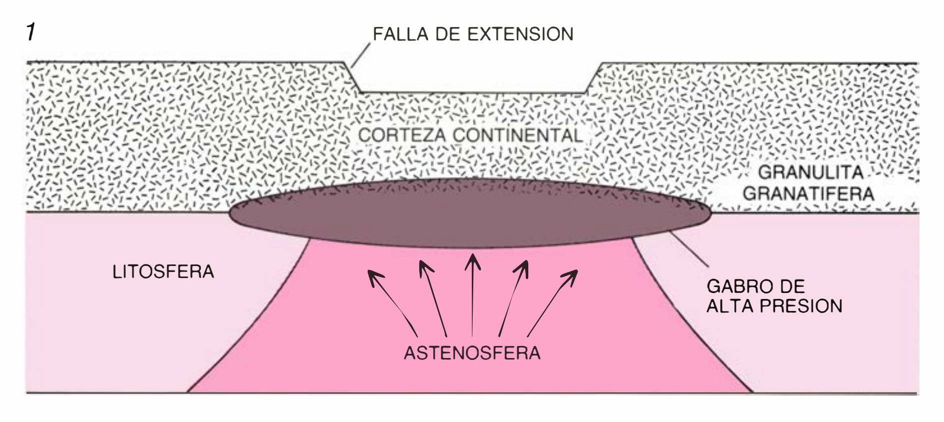
El emplazamiento de magma basáltico calienta y debilita la corteza continental. Una fracción del magma penetra por fallas y fisuras corticales y, ocasionalmente, parte hace erupción en superficie. Cuanto más se adelgaza la corteza, tanto más frecuentes resultan las erupciones; es más, las inyecciones de magma tienden a concentrarse en una zona angosta alrededor del eje del rift. Por último, la anchura de la zona se estrecha hasta unos pocos kilómetros, en los que los últimos residuos de corteza continental han sido barridos por roca del manto ascendente. El continente se ha dividido y, la corteza oceánica, formada simplemente por magma basáltico enfriado, rellena la grieta.

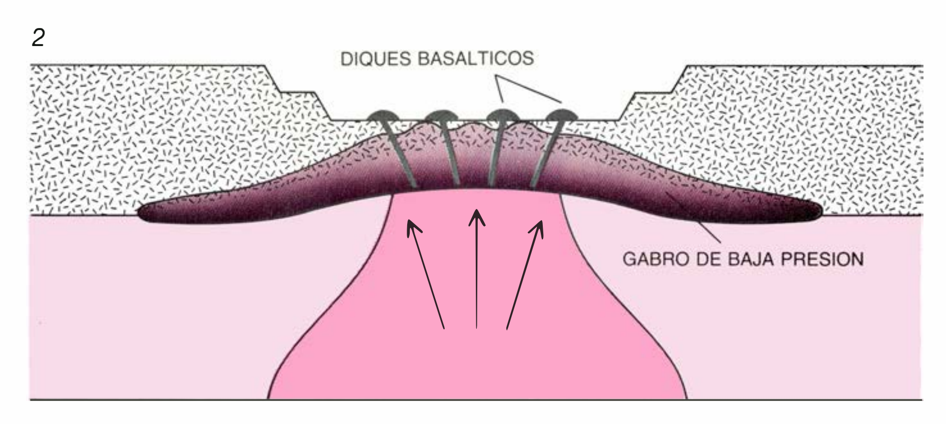
La capa superior de la corteza oceánica está compuesta por basaltos, fruto del magma que hizo erupción en superficie. Bajo los basaltos, y extendiéndose hasta la base de la corteza, hay gabros, enfriados lentamente en cámaras de magma dispuestas bajo el rift, y debajo de éstos se hallan las peridotitas del manto. Las peridotitas subyacentes al rift difieren de las restantes del manto en que han perdido la fracción fundida que formó los basaltos y los gabros. Inicialmente, las peridotitas empobrecidas forman parte de la astenosfera, porque están calientes, pero a medida que las dos placas recién separadas se van distanciando del valle de fractura, el material astenosférico se adhiere a los bordes de las placas, se enfría y se transforma en litosfera oceánica nueva. (Ello explica por qué esta litosfera crece con el tiempo.)

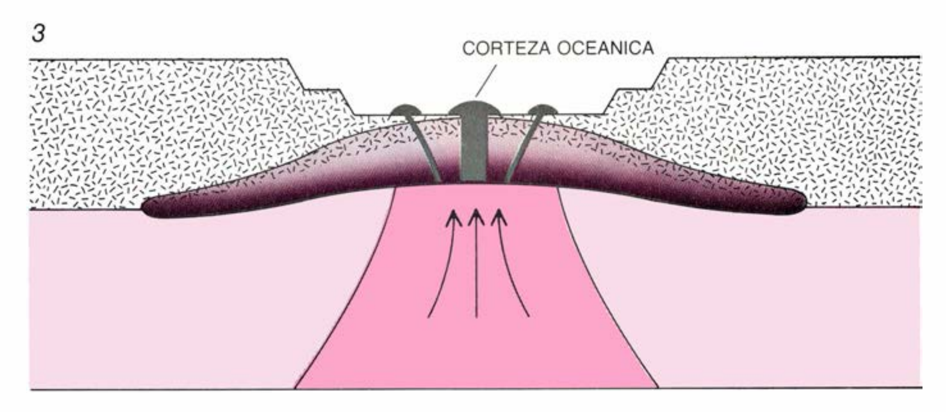
En líneas generales, la corteza oceánica se distingue fácilmente de la continental, sin necesidad de extraer muchas muestras de roca, por sus propiedades magnéticas. (Que la corteza se halle bajo agua no demuestra que sea oceánica; las plataformas continentales, que son los bordes estirados de los continentes, también están sumergidas.) Cuando el magma que mana de un valle de fractura oceánico se enfría

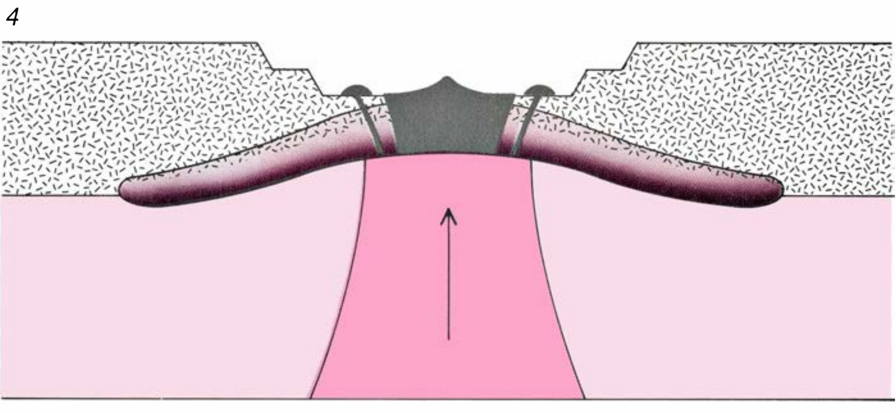


3. SISTEMAS DE RIFT de Africa oriental y Arabia, que vienen a ejemplificar estadios diferentes de la evolución de un valle de fractura. Los valles de Africa oriental (*gris claro*) configuran un sistema continental de rift: la litosfera se ha adelgazado, lo que ha permitido el hundimiento de bloques de corteza a lo largo de fallas de extensión, pero todavía no se ha partido. En el golfo de Adén, que es un rift oceánico, la litosfera continental se partió hace unos 10 millones de años y desde entonces ha estado manando magma basáltico procedente de la astenosfera, formándose corteza oceánica (*rojo*). Esa transición a valle de fractura oceánico tuvo lugar en el mar Rojo meridional más recientemente, y se está produciendo hoy en el mar Rojo central, donde se forma corteza oceánica en distintos puntos. La mayor parte del fondo del mar Rojo (y parte de la costa africana) está formada por corteza continental (*zona en gris oscuro*), no por corteza oceánica.









4. ESTADIOS DE ROTURA postulados por el autor. El primer estadio de la secuencia evolutiva lo tipifican los valles de fractura de Africa oriental (*1*), bajo cuya corteza continental se emplazan gabros. Los gabros cristalizan a alta presión y se mezclan con las granulitas granatíferas que constituyen la base de la corteza continental. En el mar Rojo septentrional (*2*), la corteza ya se ha extendido y adelgazado considerablemente. Los gabros de la base de la corteza menguante pueden distinguirse por sus rasgos químicos, pues han cristalizado a profundidades más someras y, por tanto, a menor presión. En las fisuras de la corteza también se han inyectado diques basálticos. En el mar Rojo meridional (*3*), la zona de inyección de magma se ha concentrado en el eje del rift; los bloques continentales africano y arábigo se han separado y en la grieta se forma corteza oceánica. En el golfo de Adén (*4*), el fondo del mar se está expandiendo desde hace 10 millones de años.

y forma basalto, los minerales magnéticos que cristalizan a partir del magma se alinean con el campo magnético terrestre. Permanecerán fijados en esa orientación cuando, posteriormente, la corteza se vaya alejando del rift, e incluso cuando el campo magnético invierta la polaridad, lo que ocurre a intervalos irregulares de algunos centenares de millares de años. Fruto de ello es una serie de anomalías magnéticas dispuestas en bandas paralelas al eje del rift. La presencia de anomalías en bandas, que pueden medirse desde instrumentos arrastrados por buques de investigación, constituyen una rúbrica de la corteza oceánica.

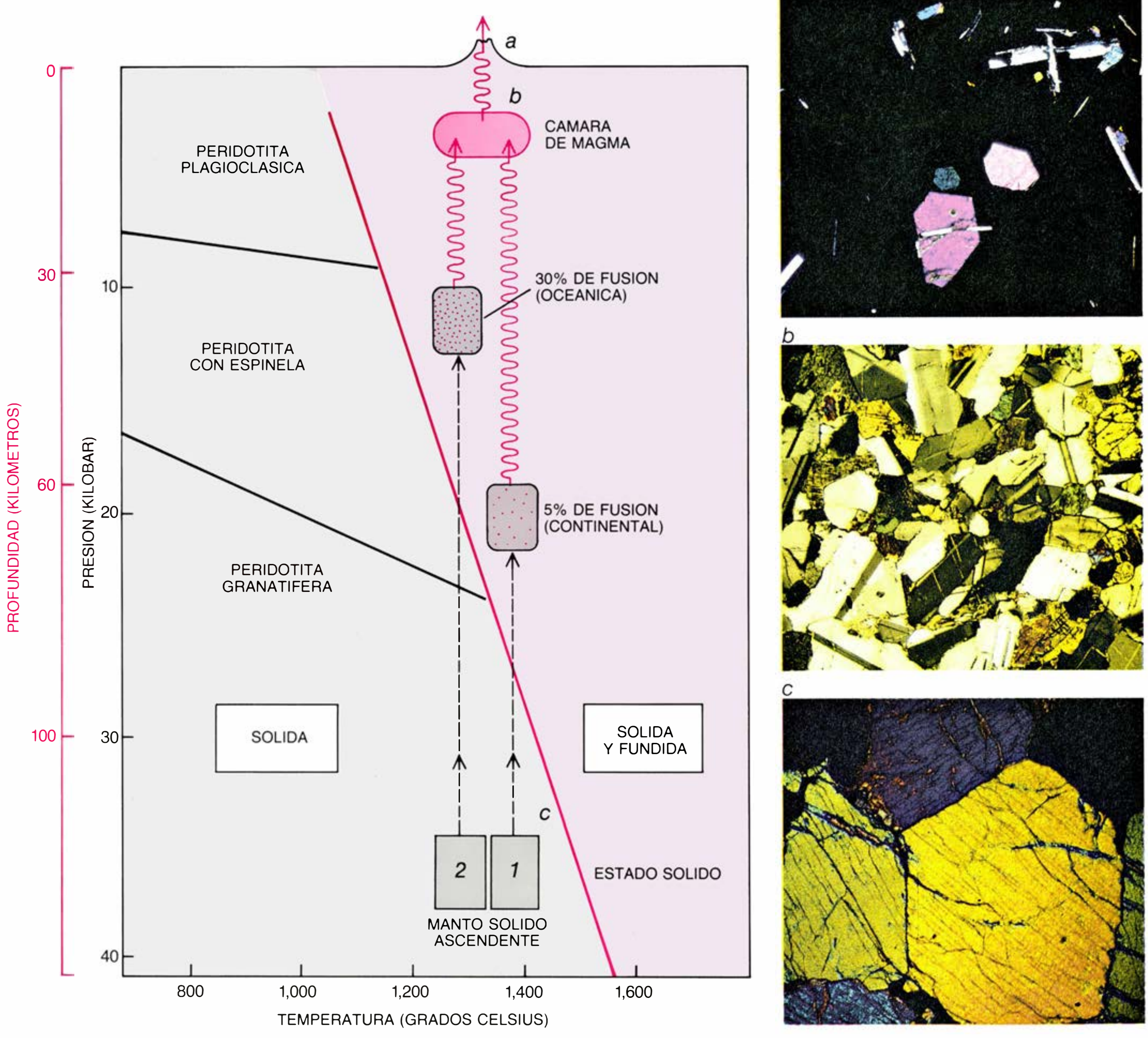
Los datos obtenidos en exploraciones magnéticas de ese tipo sugieren que en el mar Rojo central se está produciendo ahora mismo la transición de un rift continental a otro oceánico. En el mar Rojo septentrional no hay anomalías magnéticas nítidamente bandeadas, señal de que la corteza continental todavía no se ha dividido; al sur aparecen anomalías lineales asociadas a una hoya o trinchera que discurre a lo largo del eje del mar, indicio de que en ese punto el fondo marino se ha estado expandiendo desde hace algunos millones de años. En el mar Rojo central, en cambio, se distinguen anomalías magnéticas lineales fuertes, pero sólo en algunas áreas aisladas a lo largo del eje. Las anomalías están asociadas a segmentos profundos de fondo marino, espaciados a intervalos regulares de unos 50 kilómetros. De sur a norte las anomalías magnéticas pierden definición y los segmentos hondos correspondientes se hacen más breves y angostos.

Las observaciones sugieren dos conclusiones. En primer lugar, la fracturación del mar Rojo avanza de sur a norte. En segundo lugar, en el mar Rojo central la transición de un valle de fractura continental a otro oceánico y el emplazamiento inicial de corteza oceánica no han seguido una grieta axial continua, sino puntos discretos regularmente espaciados. Posteriormente, las zonas de formación de corteza se habrían extendido de puntos a segmentos lineales, produciendo las hoyas que hoy aparecen en el fondo del mar. Los segmentos lineales acabarán uniéndose en una larga zona axial de expansión del fondo marino análoga a la que ya existe en el mar Rojo meridional.

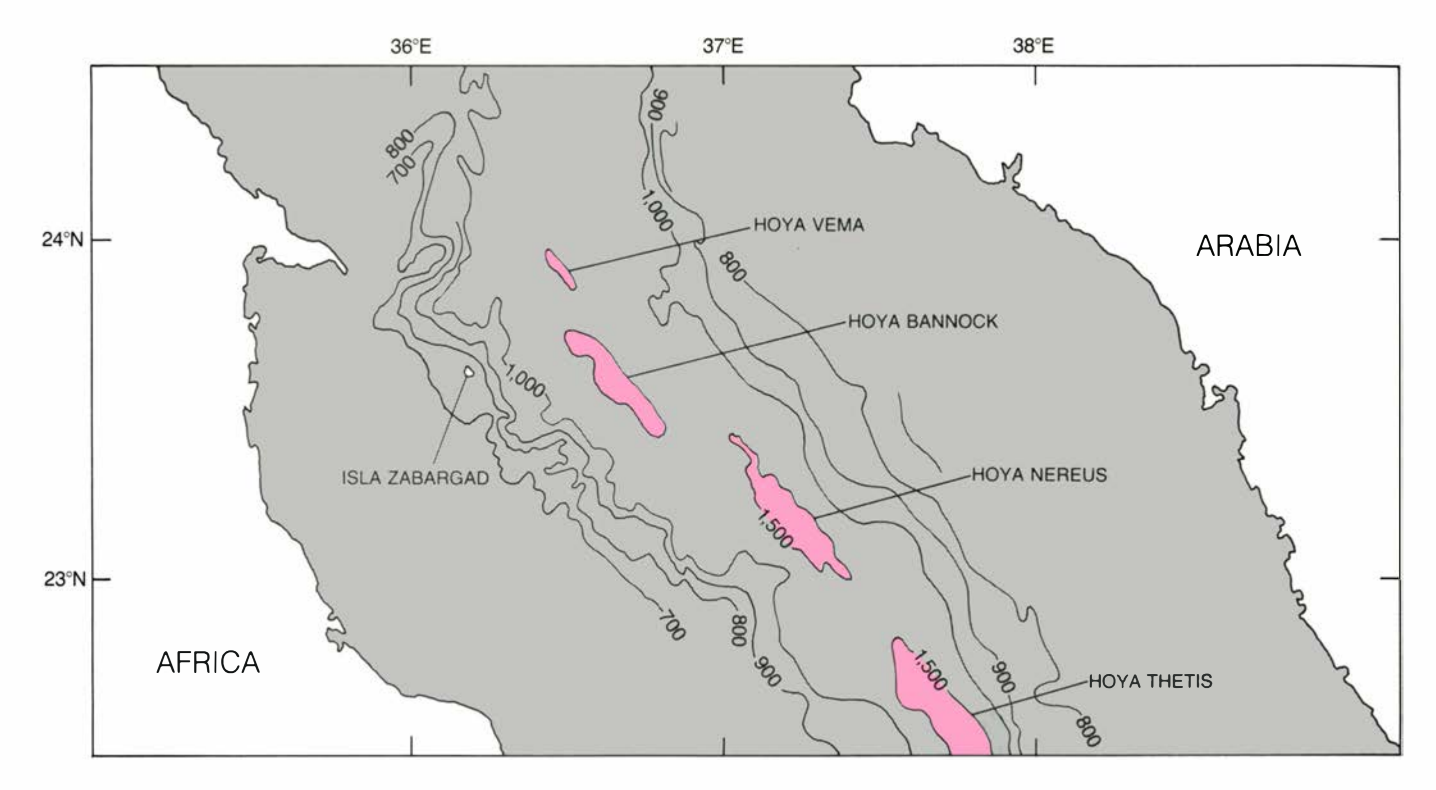
Si ese modelo es correcto, cabría esperar que aparecieran discontinuidades magnéticas y topográficas a intervalos regulares a lo largo de los ejes de ex-

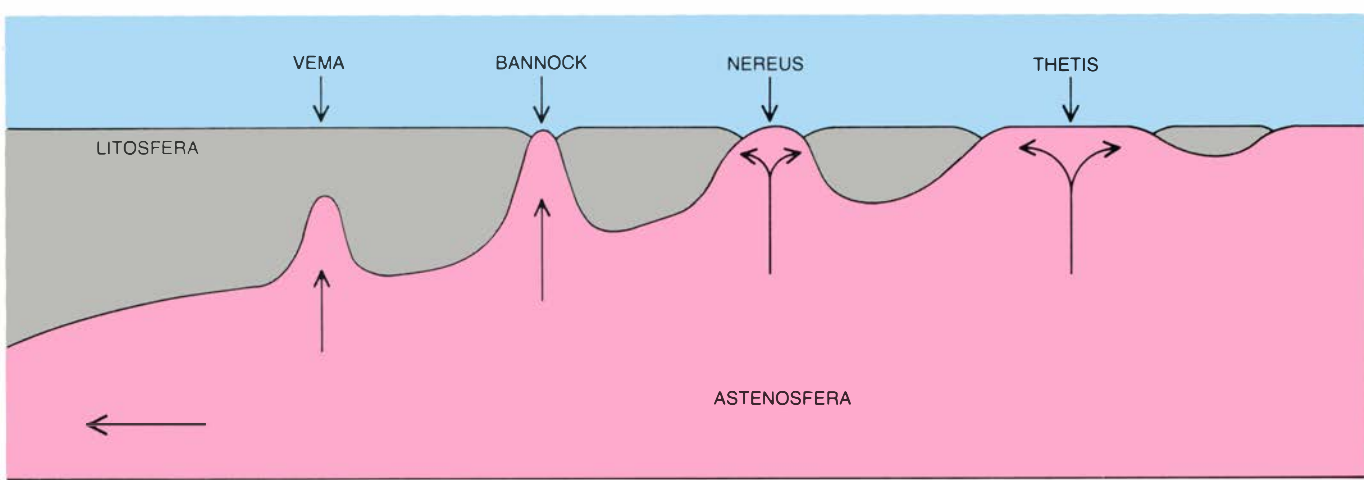
pansión; los núcleos expansivos iniciales no tienen por qué disponerse en una línea recta, y los ejes pueden encontrarse ligeramente desencajados en las uniones entre segmentos lineales. Searle y Z. Garfunkel y A. Ginzburg, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, han hallado esas discontinuidades, distantes unos 50 kilómetros, en el mar Rojo meridional. Por su parte, Hans Schouten y Kim D. Klitgord, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, han dado con descubrimientos parecidos en el Atlántico. En concreto, han detectado interrupciones equidistantes del patrón de anomalías magnéticas en un área del Atlántico occidental que se formó hace entre 155 y 108 millones de años, durante los primeros estadios de expansión del fondo marino. El inicio de la expansión del fondo marino del Atlántico y la fragmentación inicial de Europa y Norteamérica parecen haberse propulsado por medio de un proceso parecido al que actúa hoy en el mar Rojo.

¿Por qué la expansión del fondo del mar comienza en varios puntos? La respuesta probablemente guarde relación con el modelo de ascenso y fusión parcial de la astenosfera bajo los valles de fractura. La astenosfera ascendente, por estar parcialmente fundida y contener compuestos volátiles, así agua y dióxido de carbono, es menos viscosa y menos densa que la litosfera suprayacente. Esa situación genera una inestabilidad gravitatoria: el material menos denso tiende a flotar sobre el ma-



5. FUSION PARCIAL de la roca del manto bajo un valle de fractura; se produce porque la roca ascendente queda sometida a presiones progresivamente menores, mientras que su temperatura se mantiene sensiblemente constante hasta que se aproxima a la superficie. La diagonal del diagrama temperatura-presión es la línea de "estado sólido" de la peridotita (*c*): a la izquierda de la línea la peridotita es totalmente sólida; a la derecha está parcialmente fundida. El grado de fusión aumenta con la disminución de la presión. Bajo un rift continental naciente (*1*), la peridotita parcialmente fundida asciende hasta la base de la corteza continental menguante –a una profundidad de unos 60 kilómetros– y un 5 por ciento de la roca se funde. Bajo un rift oceánico (*2*), donde la corteza es más delgada, la peridotita caliente asciende hacia profundidades menores, y hasta el 30 por ciento de ella se funde. La fracción fundida se separa de la roca madre y persiste en su ascenso, dejando tras de sí peridotita empobrecida. Parte del material fundido se enfría lentamente en cámaras magmáticas, formando gabro (*b*); el resto hace erupción en la superficie y se enfría rápidamente, formando basalto (*a*). Por consiguiente, la corteza oceánica está compuesta por una capa de basalto que recubre otra de gabro. La composición de ambas rocas corticales y de la peridotita empobrecida del manto depende del grado de fusión. Por ejemplo, los basaltos hallados en rifts continentales son más ricos en metales alcalinos que los extraídos de rifts oceánicos. (Los dibujos son obra de Andrew Christie.)





6. EN EL MAR ROJO CENTRAL, las profundidades (en metros) sugieren que la expansión del suelo oceánico empieza en puntos separados (*arriba*). Las cuatro se hoyas encuentran asociadas a anomalías magnéticas bandeadas del tipo que caracteriza a las cortezas oceánicas. Fuera de las hoyas, por el contrario, el fondo marino está formado por corteza continental estirada y adelgazada. Tal vez bajo las hoyas existan diapiros ascendentes de astenosfera (*esquema inferior*).

terial más denso, y no al revés. La inestabilidad se plasma experimentalmente en el modelo de dos líquidos de densidades y viscosidades diferentes. Bruce D. Marsh, de la Universidad Johns Hopkins, y John A. Whitehead, Jr., de Woods Hole, han llevado a cabo experimentos de ese tipo, obteniendo resultados bastante sorprendentes. Cuando el líquido de densidad y viscosidad menores se inyecta bajo el otro, el límite, inicialmente horizontal, entre ambas sustancias desarrolla ondulaciones casi de inmediato. Al poco, y desde puntos equidistantes, finos penachos del líquido inferior empiezan a atravesar el líquido superior. Según se ha comprobado, la distancia entre penachos es proporcional tanto al grosor de la capa del líquido inferior como a la razón entre las viscosidades de ambas capas.

Por supuesto, la extrapolación de los modelos de laboratorio a las zonas de rift del planeta resulta arriesgada. Pero los resultados experimentales inducen a pensar que la causa de que la expansión del fondo marino empiece en varios puntos radica en que el ascenso de astenosfera parcialmente fundida bajo un valle de fractura reviste la forma de delgados diapiros, o penachos. A partir de datos experimentales cabe predecir, además, que la distancia entre diapiros dependerá del grosor de la capa que contiene la materia fundida: cuanto más gruesa sea ésta, tanto más ancho será el intervalo. Este será proporcional al grado de fusión de la capa fundida, pues cuanto mayor resulte la fracción fundida, tanto menor será la viscosidad de la capa.

Ello implica que la distancia entre diapiros aumentará con la intensidad de la anomalía térmica –que alimenta muchos diapiros– situada, bajo el valle de fractura, a gran profundidad, en el manto. Diversas observaciones indican que la distancia entre zonas de actividad volcánica tiende a aumentar desde los 50 kilómetros, a lo largo de los rift continentales, hasta los 150 kilómetros, a lo largo de los oceánicos. Además, el espaciado a lo largo de un rift oceánico es proporcional a la tasa de expansión del fondo marino; por ejemplo, las exploraciones realizadas por Kathleen Crane, de Lamont-Doherty, y por Schouten y sus colaboradores han de-

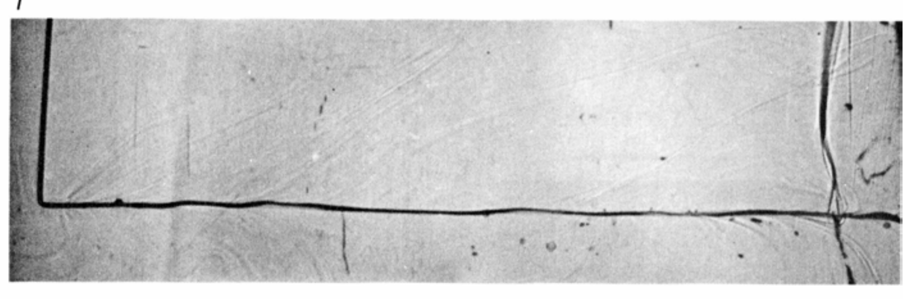
mostrado que las zonas de aumento de la inyección ígnea se hallan considerablemente más separadas a lo largo de la dorsal del Pacífico oriental, donde se separan dos placas litosféricas a un ritmo de entre 12 y 18 centímetros por año, que a lo largo de la dorsal del Atlántico medio, donde el ritmo de expansión es sólo de cuatro centímetros anuales.

Las observaciones sobre el terreno sugieren que a medida que el rift transmuta su carácter continental en oceánico, o se convierte, de rift oceánico de expansión lenta, en otro de expansión rápida, se intensifica la inyección de magma, que a la vez se hace más concentrada, dirigida por menos diapiros, de tamaño mayor. (En resumidas cuentas, sale lava por todo un rift oceánico debido a que, bajo la superficie, el material de los diapiros se dispone a lo largo del eje del rift entero.) A partir de los experimentos de laboratorio cabe, pues, concluir que el grosor de la capa fundida y el grado de fusión que se registra en la astenosfera deben aumentar durante la evolución del rift. La causa del aumento probablemente sea una intensificación de la gran anomalía térmica ubicada en el manto subyacente.

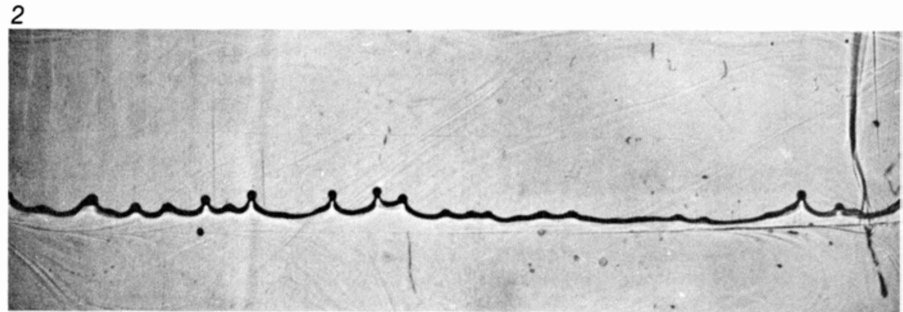
Apoyan esa hipótesis las características químicas de los basaltos corticales y peridotitas del manto hallados en zonas de rift. Los basaltos de volcanes de Africa oriental y otros rifts continentales son relativamente ricos en metales alcalinos, como sodio y potasio, elementos que se cuentan entre los primeros que se separan de la roca del manto cuando empieza el ascenso, porque se extraen de inmediato, aun cuando los grados de fusión sean bajos. Con la intensificación del ascenso y la evolución del valle de fractura hacia la fase oceánica, la fusión de las peridotitas madre se produce a presiones menores (profundidades menores) y el grado de fusión aumenta hasta el 30 por ciento. La concentración de metales alcalinos en el magma se diluye, por la permanencia de los otros elementos de extracción menos inmediata. Por consiguiente, los basaltos hallados en rifts oceánicos resultan relativamente pobres en álcalis.

El estudio de las características químicas de las peridotitas del manto ha resultado ser más difícil que el de los basaltos. Y en parte porque tanto en el fondo marino como en superficie los afloramientos de peridotitas son más escasos que los de basaltos; además, la composición de las muestras que afloran a menudo la han modificado pro-

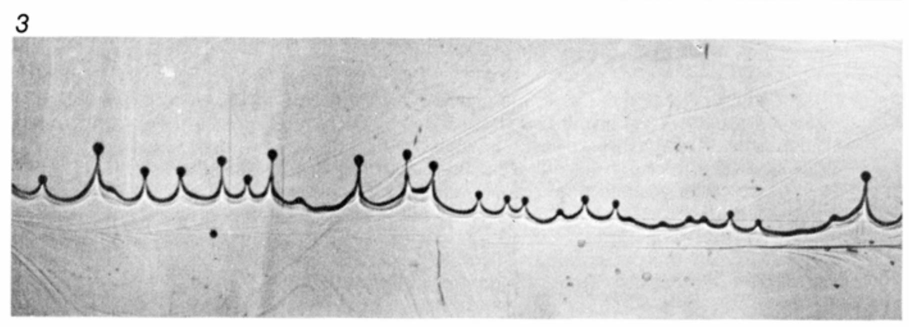
1



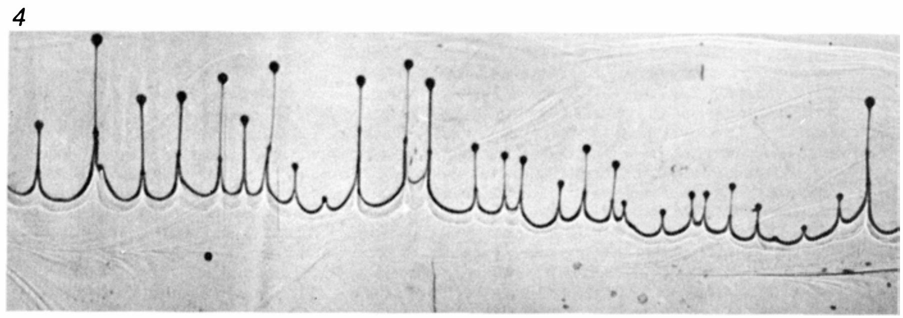
2



3



4



7. SE FORMAN DIAPIROS cuando se inyecta un líquido poco denso y poco viscoso (*línea oscura*) en otro más denso y viscoso. En el experimento que se ilustra, John A. Whitehead, Jr., de la Institución Oceanográfica Woods Hole, inyectó una mezcla de agua y glicerina en un baño de glicerina pura. A los 45 segundos, la mezcla de agua y glicerina empezó a ascender en forma de diapiros equidistantes. Un fenómeno parecido explicaría por qué la expansión del fondo oceánico empieza en puntos regularmente espaciados: la astenosfera parcialmente fundida subyacente a un rift es también menos densa y menos viscosa que la litosfera.

cesos que ocurren cerca de la superficie. En todo caso, al ser las peridotitas roca madre de los basaltos, puede decirse que su evolución durante la fragmentación debe ser complementaria. Si el grado de fusión es mayor bajo los rifts oceánicos, en ellos el manto debe haber perdido más fracción basáltica que bajo los rifts continentales. La diferencia debería reflejarse en las características mineralógicas y químicas de las peridotitas. Por experimentos de laboratorio se sabe, por ejemplo, que las peridotitas se empobrecen en clinopiroxenos a medida que van experimentando grados mayores de fusión parcial; los clinopiroxenos, que contienen la mayoría de los elementos alcalinos de la peridotita, se separan antes que cualquier otro mineral principal.

Para calcular el grado de fusión parcial experimentado por una peridotita no sólo debe examinarse su composición mineral, sino también la composición química de los minerales. Por ejemplo, la razón magnesio/hierro en el olivino y los piroxenos, los principales componentes minerales de la peridotita, aumenta con el grado de fusión. Otro indicador sensible es la composición de la espinela, un mineral raro; se trata de un óxido que contiene aluminio y cromo, además de hierro y magnesio. Puesto que el aluminio se extrae fácilmente por fusión, mientras que el cromo se mantiene en el sólido, la razón cromo/aluminio de la espinela aumenta en la fusión parcial. Nuestras mediciones demuestran que la razón cromo/aluminio de las peridotitas de Zabargad es muy baja, señal de que su fusión fue escasa, y también escaso su empobrecimiento, como cabría esperar en un rift preoceánico. Por el contrario, las peridotitas del manto extraídas de la dorsal mesoatlántica presentan una razón bastante alta, indicio de un alto grado de fusión.

Las peridotitas del Atlántico norte también exhiben variaciones regionales interesantes en lo que atañe al grado de fusión experimentada, como hemos demostrado Henry J. B. Dick y sus colaboradores, de Woods Hole, y mi colega Peter J. Michael y yo. En particular, las peridotitas de una amplia región en torno a las Azores carecen totalmente de fracción basáltica. No sorprende, por tanto, que la corteza oceánica de esa región sea excepcionalmente gruesa; según Jean-Guy E. Shilling, de la Universidad de Rhode Island, y E. Klein y Charles Langmuir, de Lamont-Doherty, la forman basaltos que, según sugiere su composición, se extrajeron del manto por un grado elevado de fusión parcial. En el resto del Atlántico, las peridotitas están menos empobrecidas y la corteza es más delgada. Parece claro que bajo las Azores existe, en el manto, un intenso punto caliente.

Las pruebas aquí presentadas abonan una conclusión sencilla: el motor que impulsa el nacimiento y la evolución de los valles de fractura, y por consiguiente la rotura de continentes y la formación de cuencas oceánicas, son las anomalías térmicas del manto superior. Las anomalías no constituyen accidentes permanentes. En el transcurso del tiempo geológico, las zonas de actividad volcánica se desplazan constantemente a lo largo del rift, hasta el punto de que tal vez resulte más apropiado concebir las anomalías subyacentes como pulsaciones, u ondas térmicas. Con todo, afirmar que la causa de la fragmentación sean las pulsaciones térmicas del manto es responder sólo a la mitad de la pregunta. ¿Qué produce las pulsaciones térmicas? La cuestión ha avivado la imaginación de muchos geofísicos y seguirá haciéndolo durante algún tiempo, pues todavía no ha recibido una respuesta sencilla y satisfactoria.

Termorregulación de las mariposas nocturnas de invierno

Curiosamente, aun a falta de adaptaciones especializadas al frío, ciertas mariposas nocturnas logran algo que a sus parientes les está vetado: volar, alimentarse y aparearse a temperaturas próximas al punto de congelación

Bernd Heinrich

El invierno supone la muerte para los adultos de muchos insectos de las latitudes medias y altas del hemisferio Norte. De no caer por el frío, mueren por escasez de alimento. Paradójicamente, los mismos peligros que acarrean la perdición de muchos de ellos, hacen del paisaje boreal un refugio para otros. Las adversas condiciones invernales obligan a las aves y los murciélagos –sus principales depredadores– a emigrar hacia el sur o a invernar. El frío mata incluso algunos parásitos.

Entre los pocos insectos que han conseguido adaptarse a la vida invernal figuran unas 50 especies de cuculiinos: una subfamilia de la amplia familia de los noctuidos. Los cuculiinos son moradores nocturnos, de apagados colores, de los bosques caducifolios septentrionales. En cierto modo, las variedades que se han adaptado a las condiciones invernales han invertido su ciclo biológico respecto del típico de los noctuidos.

La mayoría de los noctuidos sólo son activos durante las cálidas noches estivales. Mueren según se aproxima el invierno, dejando tras de sí huevos, larvas (orugas) o pupas, que permanecen inactivas hasta la primavera. Sin embargo, los noctuidos de invierno emergen como adultos durante el otoño o avanzado ya el invierno, alimentándose, apareándose y poniendo huevos antes de morir llegada la primavera. Sus orugas se alimentan, durante los albores vernales, de los brotes de los árboles del bosque, y permanecen en reposo todo el verano. (Las mariposas nocturnas de invierno se alimentan, por lo general, de la savia de árboles lesionados, aunque, hace unos años, durante las noches de finales de otoño, vi un buen número de ellas regalándose en las flores de un hamamelis, una planta de Vermont, de floración típicamente otoñal. Hasta entonces nadie sabía cómo se polinizaba la planta.)

¿Cómo consiguen sobrevivir esas mariposas nocturnas, cuando otras mueren? ¿Qué les permite evitar la congelación mientras están en reposo y qué les confiere capacidad de volar –y buscar alimento y pareja– en medio del frío reinante? Abordé primero esa última cuestión, porque me intrigaba una contradicción bien manifiesta: estaba convencido de que esas mariposas nocturnas, como otras que vuelan, eran endotérmicas, es decir, estaban dotadas de un metabolismo capaz de producir calor. Asimismo, daba por sentado que precisaban temperaturas corporales elevadas para volar. Sin embargo, parecía improbable que la endotermia por sí sola permitiera a los animales alcanzar las altas temperaturas necesarias para volar en las noches frías y, en ocasiones, nivosas.

Barruntaba que los animales tenían una elevada temperatura de vuelo porque las mariposas nocturnas de verano y las tropicales, de tamaño corporal y frecuencia de aleteo similares, sólo pueden volar cuando el tórax, que aloja los músculos del vuelo, alcanza como mínimo los 30 grados Celsius. Por otro lado, diferentes datos indicaban que los insectos diminutos (con un peso inferior a 0,2 gramos) tendrían que volar rapidísimamente para mantener esas temperaturas.

Sabido es que los animales pequeños, con una relación superficie/volumen alta, se enfrían antes que los grandes y les cuesta más conservar el calor. En realidad, durante muchos años se creyó que los murciélagos, las musarañas y los colibríes eran los animales endotérmicos más pequeños. El menor de estos vertebrados pesa tres gramos: son aún virtuales gigantes en comparación con los cuculiinos.

Para resolver el problema, primero hube de capturar mariposas nocturnas de invierno, cosa que conseguí untando troncos de árbol con cebo: miel diluida, jarabe de arce, cerveza y otros brebajes. Las mediciones de temperatura realizadas con termopares capilares revelaron que mi sospecha inicial era cierta: los insectos necesitan –y generan– una elevada temperatura torácica durante el vuelo. Aunque tienen la misma temperatura que el aire cuando están en reposo, se calientan endotérmicamente, hasta los 30 grados Celsius o más, antes de echar a volar, incluso a temperaturas ambientales próximas a los cero grados (el punto de congelación del agua).

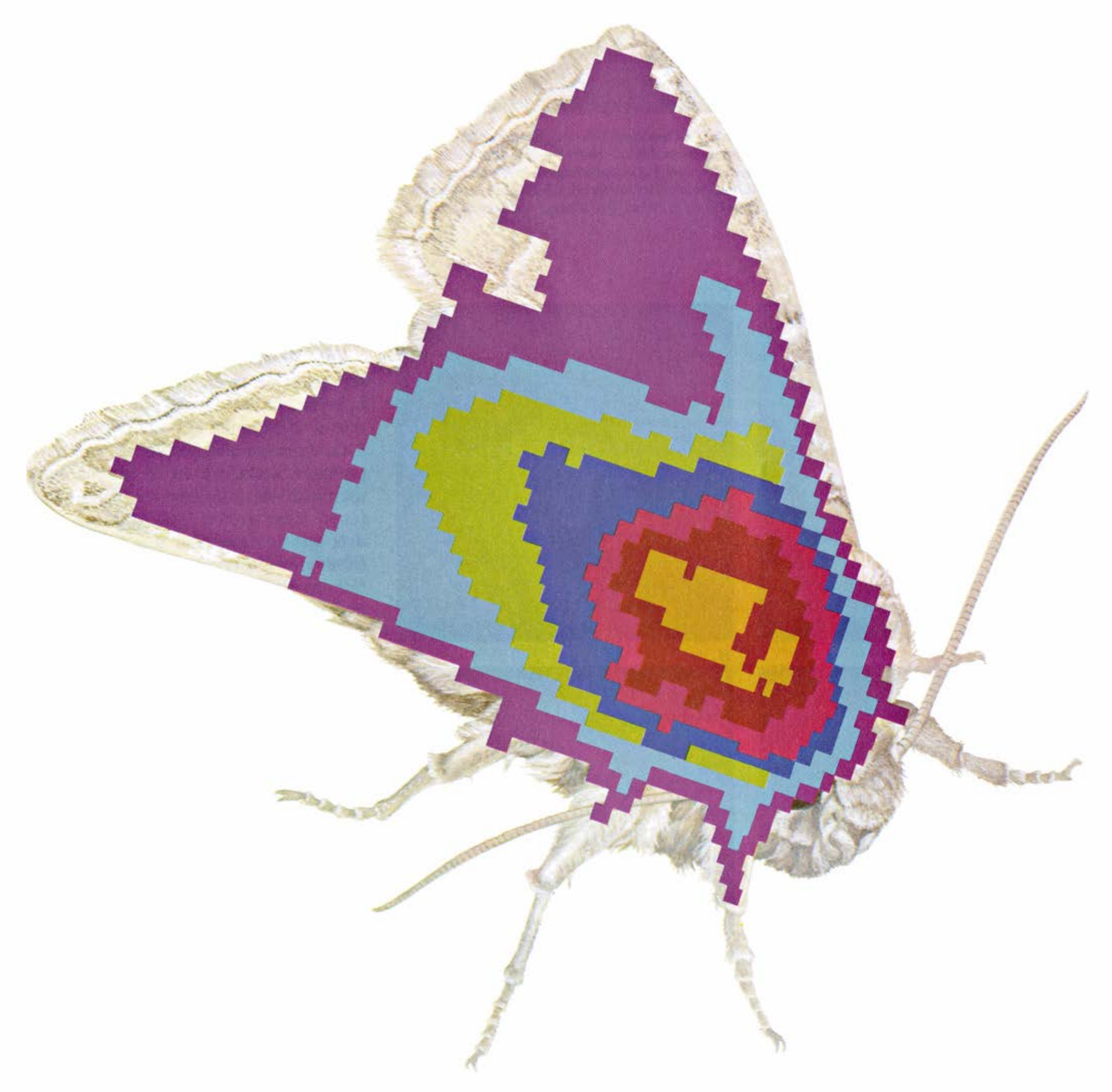
Una vez confirmado que las mariposas nocturnas generan su propio calor, intenté averiguar si se valen para ello de algún truco fisiológico especial. Era evidente, por la vibración de las alas, que los insectos obtenían calor tiritando, pero eso no constituía ninguna novedad. Ann E. Kammer, actualmente en la Universidad estatal de Arizona en Temple, había demostrado con anterioridad que los lepidópteros (mariposas diurnas y nocturnas y polillas) tiritan durante el calentamiento previo al vuelo, contrayendo simultáneamente los músculos ascendentes y descendentes mayores. Empero, había algo extraño en el comportamiento de los cuculiinos.

Por lo común, los cuculiinos de invierno entran en actividad sólo cuando la temperatura ambiente supera los cero grados Celsius, pero a veces empiezan a tiritar a temperaturas de sólo −2 grados Celsius. Todas las demás mariposas nocturnas conocidas no empiezan a tiritar hasta que el aire alcanza, como mínimo, los 10 grados. Se-

gún Harald E. Esch, de la Universidad de Notre Dame, los cuculiinos de invierno pueden activar el sistema nervioso central, y por tanto la tiritera, a temperaturas inusualmente bajas. Nadie sabe todavía cómo lo consiguen.

El calentamiento hasta los 30 grados desde una temperatura de reposo de cero grados o menor puede consumir una cantidad de energía preciosa. Así pues, me pregunté: ¿será que las mariposas nocturnas de invierno tienen una tasa metabólica elevada, que les permite generar calor con mayor celeridad y eficacia que a otras? La respuesta es que no. Medidas en función del consumo de oxígeno, las tasas metabólicas en reposo, durante la tiritera y en vuelo eran aproximadamente las mismas que las halladas por otros investigadores en muchas otras especies de mariposas nocturnas de masa corporal similar.

En realidad, las de invierno pagan, en tiempo y energía, por calentarse a bajas temperaturas. Cuando lo hacen a una temperatura ambiente de cero grados, buena parte del calor que generan se disipa en el aire y, en muchos casos, han de tiritar más de media hora para alcanzar una temperatura torácica de 30 grados. Durante el vuelo, la gran diferencia de temperatura entre el aire y el cuerpo del insecto se traduce en una pérdida acelerada de calor, lo que le obliga a detenerse una y otra vez, tiritar y calentarse de nuevo. En cambio, si el insecto aguarda a tiritar a que la temperatura ambiente ronde los 10 grados, entra antes en calor. Además, el calor que genera es suficiente para



1. MARIPOSA NOCTURNA DE INVIERNO, de la familia de los noctuidos, con un mapa infrarrojo superpuesto para mostrar la distribución del calor inmediatamente después de volar. El color amarillo indica la temperatura más elevada, seguido, en orden decreciente, del rojo, el rosa, el azul oscuro, el verde, el azul pálido y el púrpura. Para volar, los noctuidos de invierno han de mantener los músculos alares (*regiones amarilla, roja y rosa*) a unos 30 grados Celsius.



2. DOS NOCTUIDOS DE INVIERNO, *Eupsilia* (*izquierda*) y *Lithophane* (*derecha*), libando miel extendida sobre un tronco de árbol, a modo de cebo. Unas 50 especies de noctuidos –todas las de la subfamilia de los cuculiinos– permanecen activas durante los fríos inviernos boreales. Los cuculiinos de invierno se parecen, anatómicamente, a muchos noctuidos de verano, pero pueden calentar los músculos del vuelo a temperaturas ambientales muy bajas. Además, retienen mejor el calor en el tórax: que alberga los músculos alares.

a

c

b

d

3. FOTOGRAFIAS INFRARROJAS de *Eupsilia* que representan a la mariposa en sucesivos estadios de calentamiento previos al vuelo. Como otras muchas mariposas nocturnas, los cuculiinos se calientan tiritando: contraen simultáneamente los músculos de elevación y descenso de las alas. En *a* y *d*, la mariposa, posada en una vara, se ve desde arriba; en *b* y *c*, de lado. El tórax es la zona circular que aparece primero en *b* (*azul oscuro*). Igual que en la figura 1, el color amarillo representa de 26,6 a 30,9 grados Celsius; el rojo, de 24,8 a 26,5; el rosa, de 22,4 a 24,7; el azul oscuro, de 19,6 a 22,3; el verde, de 17,2 a 19,5; el azul pálido, de 14,0 a 17,1 y el púrpura de 11,0 a 13,9 grados. (Las imágenes son obra del autor y George R. Silver.)

mantener el vuelo sin escalas a una temperatura torácica de entre 30 y 35 grados Celsius.

A falta de formas "baratas" de producir calor, las mariposas nocturnas parecen seleccionar las condiciones en que pueden tiritar. La intuición apunta a que los animales han de tiritar mientras se alimentan, a fin de estar prestos a huir de los depredadores. Sin embargo, a veces no lo hacen. (Las aves y los murciélagos ya no rondan por el cielo durante el invierno, pero las musarañas, las ardillas y quizá los tragúlidos sí suponen cierto peligro.) Además, los insectos no producen calor sólo por mantenerse calientes; si no precisan volar, ni se calientan, ni se resisten al enfriamiento después del vuelo. De hecho, cuanto más baja es la temperatura del aire, menor es la probabilidad de que tiriten. En el intervalo de 5 a 8 grados Celsius sólo la mitad (el 49 por ciento) de las mariposas nocturnas examinadas durante una investigación tiritaban mientras lamían miel diluida y untada sobre los árboles. En cambio, la mayoría de los individuos (el 90 por ciento) tiritaba a unos 17 grados Celsius –la temperatura más alta a que las he observado en el campo.

Este hincapié manifiesto en la conservación de la energía a expensas de la evitación del depredador cobra sentido si se examina el coste de resistirse a un enfriamiento pasivo. A una temperatura ambiente de 0 grados, una mariposa nocturna que pese 0,1 gramos (cuyo tórax pesará 0,04 gramos), tendría que contrarrestar una tasa de enfriamiento postvuelo de 13 grados por minuto para mantener una diferencia de 30 grados entre su cuerpo y el medio ambiente. Para conseguirlo, gastaría 0,42 calorías por minuto.

Si en el ejemplo anterior la mariposa se llenara totalmente de savia de arce azucarada –obteniendo cuatro miligramos de azúcar–, la tiritera agotaría el contenido de su estómago en sólo 35,2 minutos (cada miligramo de azúcar proporciona 3,7 calorías). Sin embargo, a una temperatura ambiente de 15 grados Celsius, la mariposa quemaría azúcar mucho más lentamente. A decir verdad, podría mantener una temperatura torácica de 30 grados el doble de tiempo.

Puesto que las mariposas nocturnas no tienen mecanismos muy especializados para producir calor extra, supuse que debían disponer de un método eficacísimo de retención calórica. En realidad, tienen varios. Por supuesto, el aislamiento retarda la pér-

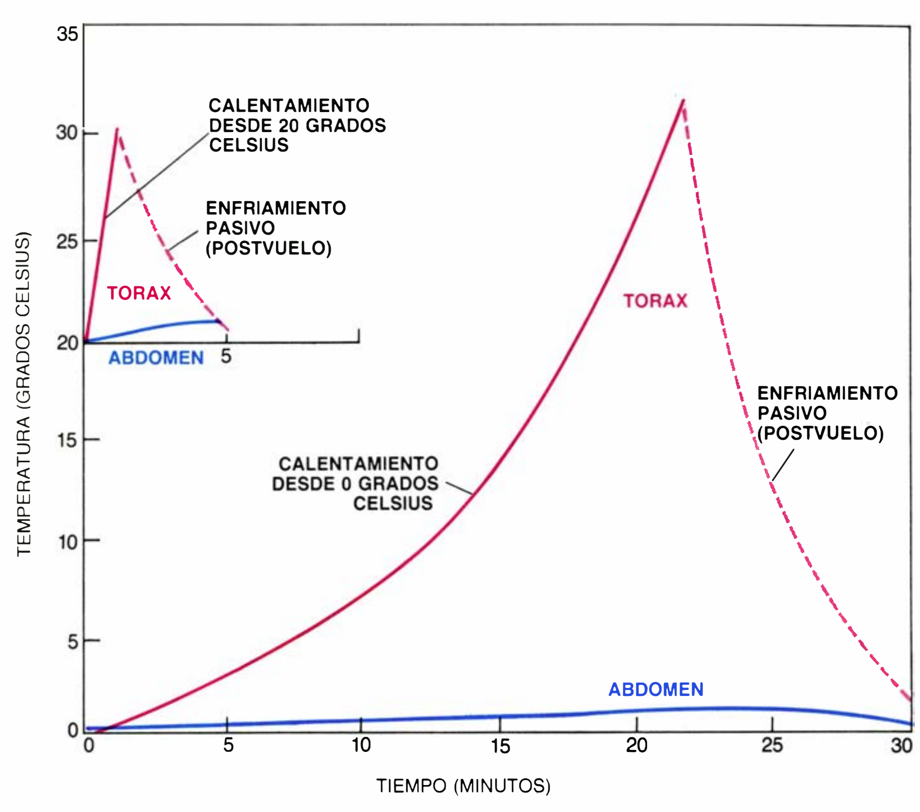
dida de calor, y las mariposas en cuestión están bien aisladas con un abrigo de pelos densos. (El pelo es un derivado de las escamas, causa primera de la belleza de la mariposa, y explica por qué a las mariposas nocturnas se les suele dar el nombre de molineras: las escamas modificadas, que se desprenden fácilmente, son blanquecinas y pulverulentas, como la harina que cubre al molinero.)

Para establecer exactamente hasta qué punto las escamas facilitan la retención térmica, medí la tasa de enfriamiento en mariposas nocturnas cubiertas de pelo y depiladas, una vez calentadas y, luego, expuestas a diversas velocidades del aire en un túnel de viento. A velocidades de siete metros por segundo, próximas a las de vuelo, las mariposas con abrigo se enfriaban unas dos veces más despacio que las desnudas.

Es evidente que la pilosidad ayuda a los animales a almacenar calor; es más, es absolutamente esencial para volar en invierno. Con todo, ciertas mariposas nocturnas de verano, como la *Malacasoma americanum*, presentan un aislamiento similar que les ayuda a salvar las noches estivales especialmente frías. Así pues, el aislamiento no explica, por sí solo, por qué los cuculiinos de invierno aguantan el frío mejor que otras mariposas nocturnas.

Lo mismo que el aislamiento, la capacidad de impedir la difusión del calor torácico hacia las zonas más frías del cuerpo ayudará también a la mariposa nocturna a conservar tan preciado calor. En efecto, por más que en grado variable, todos los insectos endotérmicos examinados hasta la fecha –entre ellos las libélulas, los abejorros, las abejas y muchas mariposas nocturnas grandes– poseen semejante capacidad. A temperaturas atmosféricas bajas, cuando necesitan conservar el calor torácico, los animales retardan el flujo térmico hacia la cabeza y el abdomen, y eliminan prácticamente la propagación hacia otras extremidades, como las alas y las patas. Los cuculiinos de invierno hacen lo mismo, aunque, en comparación con otras mariposas nocturnas, pierden aún menos calor hacia el abdomen.

La determinación de las temperaturas torácica y abdominal de los cuculiinos requería la inserción de diminutos termopares antes de que se calentaran. Durante el calentamiento previo al vuelo, el abdomen se mantuvo a unos 0,4 grados de la temperatura del aire. De hecho, la temperatura abdominal sólo aumentó dos grados, en promedio, durante el vuelo, mientras que la torácica lo hizo hasta 35.



4. TEMPERATURAS TORACICA Y ABDOMINAL de *Eupsilia*, representadas en función del tiempo, a medida que el cuculiino se prepara para emprender el vuelo. Cuando la temperatura ambiente es de 20 grados Celsius (*recuadro de la izquierda*), la mariposa nocturna puede calentar su tórax hasta 30 grados en 1,5 minutos, mientras que, cuando el aire está a cero grados (*derecha*), ha de tiritar durante 22 minutos para alcanzar esa misma temperatura. Para ahorrar energía, los cuculiinos de invierno suelen evitar calentarse para volar cuando la temperatura ambiente ronda los 0 grados Celsius. También la ahorran impidiendo la fuga de calor hacia el abdomen (*azul*), que siempre se mantiene a escasos grados de la temperatura ambiente. (Se retuvo a las mariposas mediante una atadura; se enfriaban rápidamente cuando no podían despegar.)

En colaboración con George R. Silver, que perteneció al Departamento de Investigación del Frío, del Instituto de Investigación sobre Medicina Ambiental del Ejército de los Estados Unidos en Natick, Massachusetts, también fotografié los insectos con una cámara infrarroja. La cámara no registra los detalles externos, sino la emisión térmica. Nuestras imágenes confirmaron que las patas, las alas y el abdomen de las mariposas nocturnas de invierno absorben poco o ningún calor durante el calentamiento, el vuelo y el ulterior enfriamiento.

¿Cómo se las arregla una mariposa nocturna para mantener una diferencia de más de 30 grados entre el tórax y el abdomen –segmentos del tronco separados por sólo uno o dos milímetros? Sorprendentemente, parte de la respuesta radica en la anatomía del oído de la mariposa. Los tímpanos de los noctuidos están en la zona posterior del tórax, donde quedan envueltos por unas cámaras de aire que ofrecen un aislamiento térmico casi perfecto. (Nadie sabe si los oídos de las mariposas de invierno siguen funcionando como lo hicieron en otro tiempo: como detectores de los ultrasonidos emitidos por los murciélagos.) Además, estas cámaras se sitúan cerca de los sacos aéreos abdominales, lo cual brinda un aislamiento adicional.

El sistema vascular contribuye también a prevenir la pérdida de calor desde el tórax. La sangre, que transporta el alimento almacenado en el abdomen, podría anular la capacidad de aislamiento térmico de los sacos aéreos. Fluye por un único vaso desde el abdomen (donde dicho vaso recibe el nombre de corazón) hasta la cabeza [*véase la figura 6*], pasando por el tórax. Desde la cabeza irriga los tejidos circundantes, filtrándose, en última instancia, de vuelta al abdomen.

En teoría, la sangre que retorna al abdomen podría transportar calor desde el tórax. En la práctica, un tramo del sistema circulatorio del abdomen y otro del tórax actúan de intercambiadores del calor por contracorriente: estructuras que, en este caso, secuestran el calor antes de que escape totalmente del tórax. En un intercambiador de ese tipo, dos fluidos (o gases) dispuestos en



5. CUBIERTA DE PELOS (escamas modificadas) de los cuculiinos de invierno que facilita la retención térmica. El aislamiento contribuye a asegurar la supervivencia de las mariposas nocturnas de invierno, pero no es exclusivo de ellas; muchas mariposas nocturnas de verano también tienen un pelaje de ese tipo.

conductos independientes, aunque adyacentes, fluyen en sentidos contrarios. Si el fluido de un conducto está más caliente que el del otro, el calor se transmite del primero al segundo.

El intercambiador abdominal de los cuculiinos está debajo de los sacos aéreos de la mariposa. Se compone del vaso sanguíneo que transporta sangre fría del abdomen al tórax y de la estrecha región de tejido que rodea al vaso. La sangre que se ha calentado en el tórax fluye por ese tejido hacia el abdomen, lo cual significa que se mueve en sentido opuesto al de la sangre vascular. Así, el calor del tejido se transmite a la sangre fría que va al tórax.

A medida que el vaso sanguíneo deja el abdomen y penetra en el tórax, se convierte en la aorta –el segundo intercambiador térmico de los cuculiinos. Una vez en el tórax, el vaso forma una U invertida con los dos brazos apretados entre sí. Primero el vaso discurre hacia lo alto del tórax, pero luego se curva bruscamente hacia abajo, desviándose por fin hacia la cabeza. La sangre que entra en el tórax procedente del abdomen se halla inicialmente más fría que el propio tórax, pero se calienta en su curso por el mismo. Así, en el brazo descendente de la U la sangre está más caliente que en el ascendente: el calor vuelve a este último en vez de viajar hacia la cabeza con el fluir de la sangre.

Una manera ideal de evaluar la efectividad de un intercambiador térmico consiste en alterar la configuración del vaso sanguíneo. Por ejemplo, cabría separar los tramos ascendente y descendente del intercambiador torácico y estimar cuánto calor de la rama descendente se perdería en esas condiciones hacia la cabeza. Por desgracia, resulta casi imposible practicar semejante intervención quirúrgica en una minúscula mariposa nocturna sin incidir en otros muchos aspectos, verbigracia, la velocidad del flujo sanguíneo, que a su vez puede influir en el transporte de calor por el cuerpo.

No obstante, se puede estimar la eficacia de los intercambiadores de los cuculiinos de invierno comparando su sistema vascular con el de otras mariposas nocturnas, como las esfinges (Sphingidae) y los satúrnidos gigantes (Saturniidae), animales, unos y otros, de cuerpo grande, que viven sobre todo en los trópicos. En estos insectos, la aorta forma un "serpentín de enfriamiento", no un intercambiador de calor. El tramo descendente, muy largo, serpentea, distanciándose del ascendente. En vez de reintegrar el calor en el otro brazo de la aorta, el vaso espiral lo retiene y lo transporta fuera del tórax.

Las diferentes fisiologías parecen producir efectos notablemente distintos. Las esfinges y los satúrnidos gigantes son hasta 60 veces mayores (en masa) que los cuculiinos y, por consiguiente, cabría esperar que se sobrecalentaran más fácilmente. Sin embargo, disipan el exceso de calor hacia la cabeza y el abdomen, y desde allí al aire. En realidad, con frecuencia vuelan a temperaturas ambientales por encima de los 30 grados Celsius. Los cuculiinos, en cambio, nunca se deshacen del exceso de calor. A pesar de su ínfimo tamaño, dejan de volar por abatimiento térmico cuando la temperatura ambiente se aproxima a los 20 grados. Este mecanismo de retención de calor, de extraordinaria eficacia, tiene, a lo que se ve, un precio, pero son contadísimas las ocasiones en que han de pagarlo.

Aunque los intercambiadores térmicos de las mariposas nocturnas de invierno retienen activamente el calor, el sistema circulatorio de los insectos, al igual que su envoltura pilosa, no es totalmente singular. A decir verdad, es análogo al de muchas mariposas nocturnas estivales de pequeño tamaño. Por ejemplo, en la aorta de los lasiocámpidos, el brazo descendente está cerca del ascendente, pero no juntos. No obstante, esta pequeña diferencia parece influir en la retención de calor. Los lasiocámpidos, que en vuelo mantienen la misma temperatura torácica que los cuculiinos de invierno, poseen una modesta capacidad de descarga térmica. Por consiguiente, pueden volar a temperaturas algo más altas que las mariposas nocturnas de invierno, pero no consiguen hacerlo a temperaturas ambientales bajas.

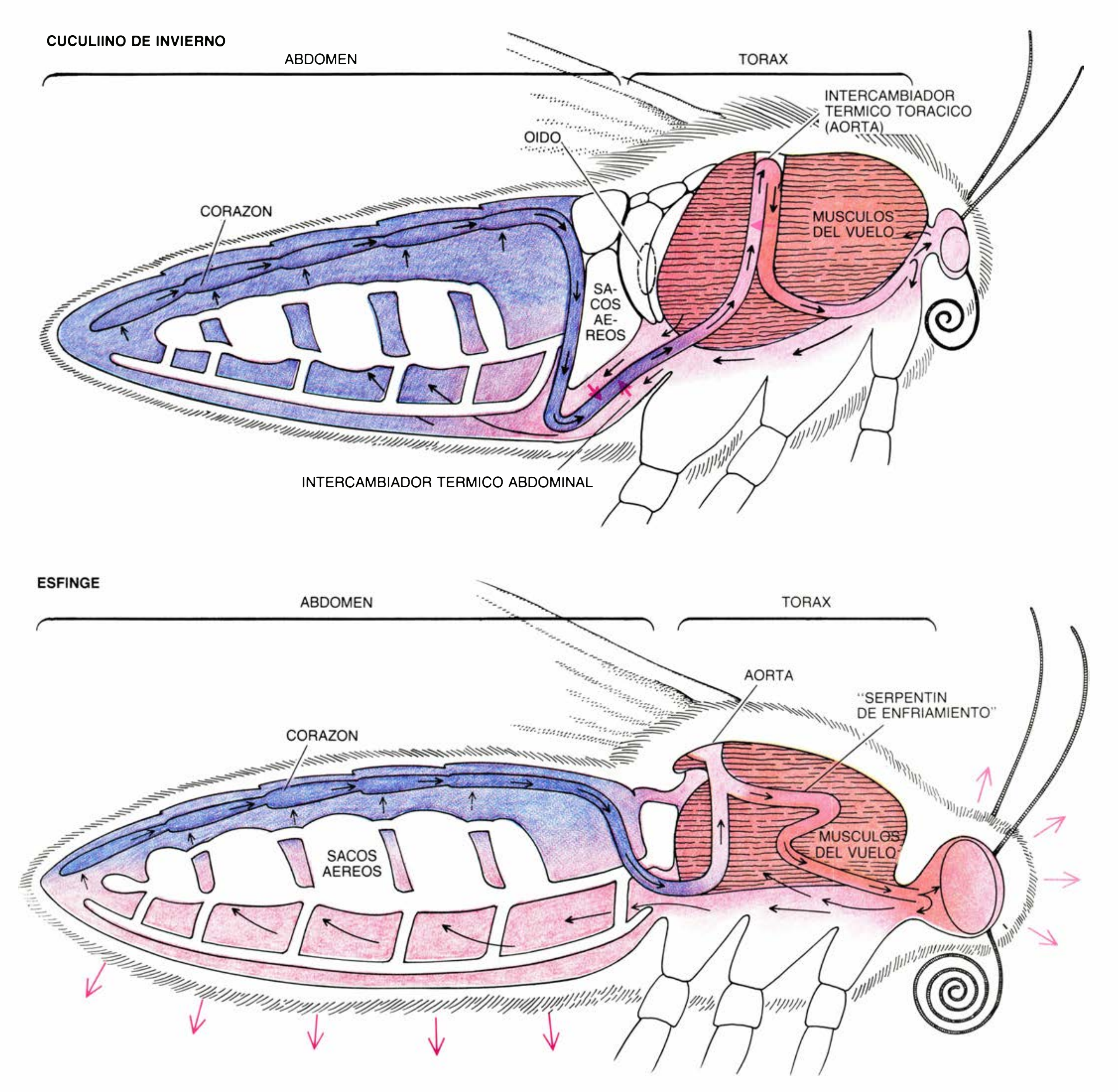
Producir y retener el calor necesario para volar es sólo una parte de la solución del problema que plantea la supervivencia invernal. Las mariposas nocturnas de invierno pasan cuando menos el 99 por ciento del tiempo frías o sumidas en el entumecimiento; necesitan, pues, algún mecanismo para evitar la congelación, o la solidificación, mientras permanecen a la espera de una noche "cálida".

Los estadios inmaduros de muchos insectos estivales sobreviven al frío produciendo anticongelantes biológicos. Me pregunté si las mariposas nocturnas de invierno también lo hacían. Guardando mariposas nocturnas en un

congelador durante un promedio de tres semanas, John G. Duman, de la Universidad de Notre Dame, y yo determinamos el punto de congelación estándar de la sangre de los insectos, es decir, el punto en el que se forman cristales de hielo internos. Hasta los cristales minúsculos estimulan la congelación, pues aportan una superficie para la fijación de las moléculas de agua próximas.

Las mariposas nocturnas se congelan entre −1 y −2 grados Celsius, en la proximidad del punto de congelación de los insectos adaptados a las condiciones estivales. La sangre de las mariposas nocturnas recién capturadas en el campo tenía prácticamente el mismo punto de congelación. Esas observaciones indicaban que los cuculiinos producen escaso o ningún anticongelante; si tuvieran tal sustancia en la sangre, no se congelarían hasta que ésta alcanzara temperaturas muy inferiores.

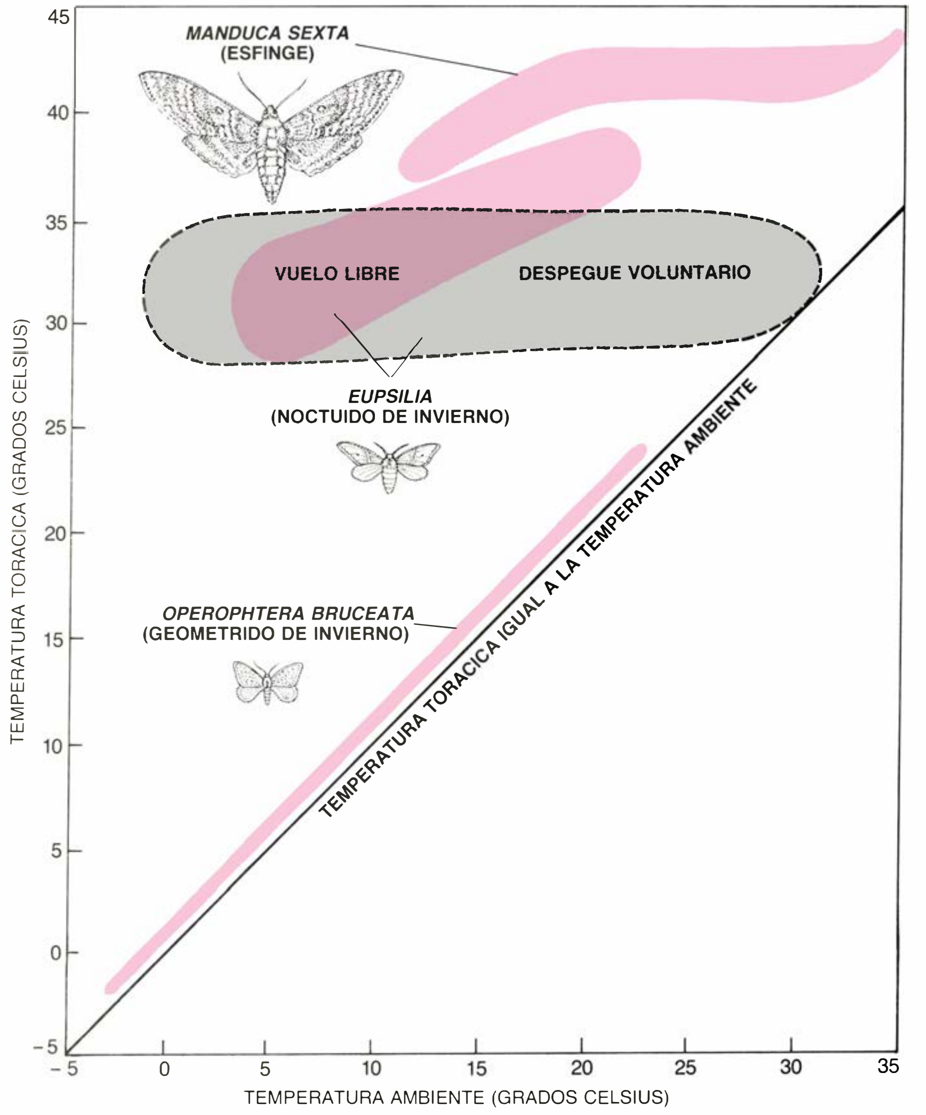
Quedaba la posibilidad de que las mariposas nocturnas gozaran de una capacidad especial para sobreenfriarse (permanecer sin congelarse a temperaturas por debajo del punto de congelación estándar), si conseguían que no entrase ni se formara en el cuerpo ningún cristal de hielo que pudiera actuar de "semilla". El límite del so-



6. ANATOMIA de un cuculiino de invierno (*arriba*), que difiere de la de una mariposa nocturna de verano (*abajo*). Los sacos aéreos de la mariposa nocturna de invierno aíslan el tórax, reteniendo el calor en él. El sistema circulatorio también conserva el calor torácico. En todas las mariposas nocturnas, la sangre (*flechas negras*) fluye por un vaso único desde el abdomen hacia la cabeza, pasando por el tórax, y se calienta durante el recorrido; en el viaje de vuelta se difunde a través de los tejidos. El sistema circulatorio de una mariposa de invierno presenta dos intercambiadores de calor por contracorriente: uno abdominal y otro torácico. En el abdominal, la sangre que fluye entre el corazón y la aorta está fría (*azul*), mientras que la que lo hace en sentido contrario, a través de los tejidos adyacentes, está caliente (*rojo*); por consiguiente, se transmite calor (*flechas rojas*) desde el tejido al vaso sanguíneo, y luego al tórax. El intercambiador térmico torácico es la aorta. Puesto que la sangre del brazo descendente del recodo está más caliente que la del brazo ascendente, el calor se transmite hacia este último segmento. En las grandes mariposas nocturnas de verano, el tramo descendente de la aorta está separado del ascendente, perdiéndose calor.

breenfriamiento viene definido por el momento en el que el crecimiento acelerado, fulgurante, de los cristales de hielo congela súbitamente al animal sobreenfriado. Este momento era de fácil identificación merced a la brusca y momentánea elevación de la temperatura en las mariposas nocturnas; al incorporarse las moléculas de agua a un cristal de hielo que se propaga espontáneamente, emiten calor, que puede producir un incremento de la temperatura de unos pocos grados. Este punto representa, asimismo, la muerte de los cuculiinos de invierno, pues ninguno sobrevive a la congelación.

En las mariposas nocturnas enfriadas muy lentamente en un medio ambiente desprovisto de hielo, el límite de sobreenfriamiento variaba dentro de un amplio abanico de valores, desde −4 a −22 grados Celsius. Además, el instante en que sobrevenía la congelación no se localizaba en torno a una temperatura determinada. Semejante variabilidad indicaba que, en las mariposas nocturnas de invierno, el sobreenfriamiento es un fenómeno aleatorio, no un carácter adaptativo. A decir verdad, la capacidad de sobreenfriamiento de estas mariposas es similar a la de muchas mariposas nocturnas de verano que nunca se enfrentan a temperaturas de congelación.



7. TEMPERATURAS AMBIENTE Y TORACICA a las que una mariposa nocturna de verano emprende el vuelo continuo, comparadas con las de mariposas nocturnas de invierno. *Manduca sexta*, una esfinge de verano, ha de calentar el tórax hasta cerca de los 40 grados Celsius antes de volar; puede permanecer en el aire a temperaturas ambiente de hasta 35 grados Celsius. Como otras muchas mariposas de verano, no puede emprender el vuelo hasta que la temperatura ambiente ronda los 12 grados. *Eupsilia* vuela a temperaturas torácicas más bajas. Puede despegar cuando la temperatura ambiente se encuentra en el intervalo de entre −2 y 30 grados Celsius (*gris*), si bien no consigue sostener el vuelo en los extremos de dicho intervalo. Cuando el aire está por debajo de los cinco grados, la mariposa interrumpe el vuelo una y otra vez para tiritar; si supera los 20 grados Celsius el animal se sobrecalienta. *Operophtera bruceata*, uno de los pocos geométridos adaptados al invierno, puede volar a temperaturas ambiente que oscilan entre −3 y 25 grados Celsius y casi no precisa calentar el tórax. Se sobrecalienta a temperaturas ambiente (y torácicas) próximas a los 25 °C.

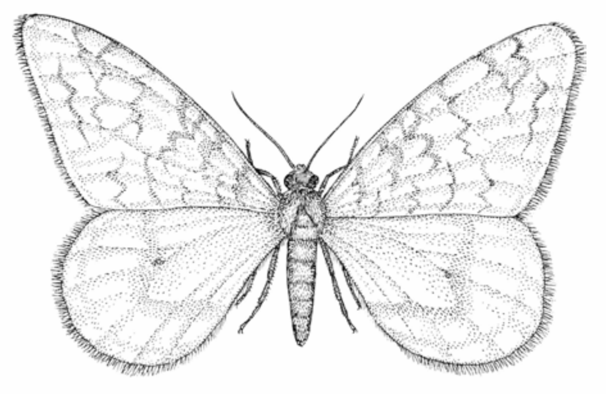
Aunque el sobreenfriamiento no constituye, probablemente, una adaptación específica para la supervivencia invernal, toda capacidad de enfriarse por debajo del punto de congelación estándar permitirá a los insectos sobrevivir a temperaturas ambientales bajas, siempre y cuando permanezcan en un lugar seco, a resguardo del hielo que pudiera penetrar en el cuerpo y actuar como cristal germinal. Una pequeña cavidad seca en el suelo, en un tronco en descomposición o debajo de una corteza, constituye a menudo el hábitat idóneo de los insectos en hibernación. ¿Dónde pueden posarse las mariposas nocturnas de invierno para escapar del hielo y de las bruscas caídas de su temperatura corporal?

Un observador que sepa que la coloración suele brindar protección imaginaría de inmediato que las mariposas nocturnas reposan en los árboles. ¿Por qué, si no, como es el caso de sus parientes adaptadas al verano, habrían de presentar coloraciones que proporcionan camuflaje contra un fondo de tronco de árbol? Hay, por ejemplo, mariposas nocturnas blancas y crema que son casi invisibles sobre un tronco de abedul; mariposas marrones que se pierden sobre un abeto o una pícea; variedades negras que casi desaparecen contra una corteza de fresno; grises que armonizan con el haya o el olmo; e incluso algunas jaspeadas que parecen líquenes.

Descubrí el lugar de reposo de las mariposas nocturnas construyendo un gran recinto al aire libre y dejando en él troncos de pino, pícea, abedul, haya, fresno, arce, olmo y cerezo; una capa de hojarasca cubría el suelo. Un atardecer solté 173 mariposas nocturnas de diversos colores y las busqué a la mañana siguiente. La mayoría de los insectos se había agazapado debajo de la hojarasca o en las hojas abarquilladas que había sobre el suelo.

Las hojas constituyen un excelente aislante del frío. Medí temperaturas no inferiores a los −2 grados Celsius bajo la cubierta del suelo, cuando la temperatura ambiente era inferior a los −30 grados. Ese improvisado abrigo suele estar cubierto de nieve, que representa una barrera más contra el frío, aunque quizás innecesaria. Dale F. Schweitzer, de la Universidad de Yale, ha demostrado que la hojarasca brinda suficiente aislamiento, cuando menos a temperaturas de hasta −23 grados.

Las mariposas nocturnas que se ocultan debajo de las hojas no necesitarían camuflaje. La explicación de su color




8. MACHO DE *OPEROPHTERA* (*izquierda*), que posee alas muy grandes, característica que ayuda a explicar por qué puede volar sin calentar significativamente los músculos alares. A diferencia de los cuculiinos de invierno, que baten las alas unas 60 veces por segundo, el macho de *Operophtera* lo hace dos veces por segundo. La hembra (*derecha*) no vuela como otros insectos adaptados al invierno; los adultos no comen.

podemos hallarla en su historia evolutiva. Que las características externas y fisiológicas de las mariposas nocturnas de invierno sean muy similares a las de verano induce a pensar que las variedades adaptadas a las condiciones invernales evolucionaron a partir de antepasados que eran activos en verano. Si así fue, hubo probablemente una época en que las mariposas de invierno se posaban en los árboles. Cuando adoptaron las nuevas costumbres, la coloración se convirtió en un carácter neutro y no experimentó alteración. De suponer que esta hipótesis es correcta, síguese que, repetidamente y de modo independiente, evolucionó un ciclo biológico "invertido". En realidad, según John G. Franclemont, de la Universidad de Cornell, los hallazgos taxonómicos indican asimismo que los cuculiinos son polifiléticos (descendientes de más de una línea ancestral) y que todos han desarrollado la misma estrategia de supervivencia invernal.

Las mariposas nocturnas suelen buscar abrigo para evitar la congelación mientras reposan, pero en otras ocasiones pueden optimizar el balance energético evitando un escondrijo demasiado acogedor. En efecto, cuanto más baja mantienen la temperatura corporal en reposo (sin llegar a la congelación), más tiempo les durarán las reservas de energía. La razón es que el metabolismo se enlentece con el frío. Por ejemplo, a partir de mediciones del metabolismo energético de mariposas nocturnas en reposo, calculo que una que pese 0,1 gramos, repostada con seis miligramos de azúcar de la savia, puede reposar durante 193 días a una temperatura ambiente (y corporal) de −3 grados Celsius. A tres grados más, el combustible duraría sólo 24 días y, a 10 grados, la reserva se agotaría en 11 días escasos. Lo que no sabemos aún es si las mariposas nocturnas intentan realmente permanecer a la temperatura más baja posible. Hacerlo así entrañaría un riesgo considerable: si los insectos miraran de posarse, quietos, en lugares desabrigados, podrían enfriarse demasiado y congelarse.

Las pruebas acumuladas indican que las mariposas nocturnas no presentan adaptaciones muy especiales para hacer frente al frío, lo mismo que no tienen adaptaciones singulares para generar calor. Por otro lado, la adaptación etológica de buscar abrigo en las hojas les va perfectamente bien. Les permite una gran flexibilidad. Pueden entrar en actividad en cuanto el aire está lo bastante templado para echar a volar y, sin embargo, también pueden hallar refugio si las temperaturas caen en picado durante la misma noche. Los insectos con adaptaciones que les permiten sobrevivir a la congelación mediante perfusión con anticongelantes necesitarían un tiempo considerablemente más largo para cobrar plena actividad, tiempo que las noches invernales pueden no ofrecer. A concentraciones elevadas, los anticongelantes (sobre todo alcoholes) son tóxicos y sumen a los animales, temporalmente, en un estado comatoso; en último término esas substancias se convierten en productos menos tóxicos, pero el proceso discurre con lentitud, en particular cuando la temperatura del animal es muy baja.

Los cuculiinos de invierno parecen hallarse bien adaptados al clima frío, pero sería erróneo concluir que sus características son las únicas compatibles con la actividad invernal. En las gélidas noches de Nueva Inglaterra se ve a los machos de la especie *Operophtera bruceata* volar a través del bosque en busca de las ápteras hembras limaciformes. Esas mariposas nocturnas, que también vuelan en días soleados, son activas a temperaturas de hasta −3 grados Celsius y durante las suaves nevadas de noviembre. (A finales de noviembre, antes de desaparecer por completo, los machos vuelan sólo durante las horas cenitales de los días soleados.)

Operophtera, que es una de las pocas especies de la familia de los geométridos que se han adaptado al invierno, ni se asolea (típica conducta de calentamiento de los insectos que vuelan de día), ni tirita, ni tiene el aislamiento de los cuculiinos. En cambio, los machos son activos a una temperatura corporal extraordinariamente baja: son las únicas mariposas nocturnas que vuelan, como si nada, a una temperatura muscular próxima a 0 grados. Excusada de la necesidad de calentarse antes de remontar el vuelo, *Operophtera* se ahorra la cantidad de energía que, de otro modo, se destinaría a tiritar.

Sus alas enormes y reducido peso corporal contribuyen a ese ahorro de energía: permiten que los insectos permanezcan en el aire con una baja frecuencia de batido de alas, de dos a cuatro aleteos por segundo: muchísimo menor que los más de 60 por segundo que precisan los cuculiinos. En común con muchos insectos adaptados al invierno, los adultos no comen; de hecho, ya no tienen tubo digestivo. (Toda la energía que emplean se acumula y almacena en el estadio larval.) Resulta imposible discernir entre causa y efecto, pero la pérdida de la necesidad de cargar con un aparato digestivo redujo probablemente las exigencias energéticas del vuelo.

Los geométridos que viven cerca de las tierras bajas ecuatoriales tienen características físicas similares a las de *Operophtera*, pero menos exageradas. Lo mismo que en los cuculiinos de invierno, el diseño de *Operophtera* para mantener la actividad en un clima frío da la impresión de estar modelado en una forma preexistente, aunque absolutamente distinta de la que presentan los noctuidos.

La notable capacidad de ciertos noctuidos y geométridos para mantenerse activos durante el invierno subraya de qué manera los pequeños cambios evolutivos de anatomía, fisiología y comportamiento pueden acrecentar el éxito en un nuevo medio ambiente. Las mariposas nocturnas de invierno aún son muy parecidas a sus parientes próximos, pero, consideradas en conjunto, adaptan las pequeñas diferencias a la vida invernal.



1. MADRE E HIJO MESOLITICOS, enterrados juntos en una sepultura descubierta con otras tumbas en un yacimiento próximo a la ciudad danesa de Vedbaek. La mujer era una adulta joven, su hijo un recién nacido. El objeto que hay entre los huesos del niño es un cuchillo de sílex. Los dientes alrededor del cráneo de la madre son de ciervo; estaban ajustados a una prenda de piel. (La piedra redonda al otro lado de la calavera es resultado de un minado posterior por obra de animales.) El cementerio, llamado Henriksholm-Bøgebakken, data del 4000 a. C. Su excavación, comenzada en 1975, despertó un nuevo interés en el área de Vedbaek, que en tiempos mesolíticos era una ensenada. En el Mesolítico medraron grupos humanos en formaciones densas, opulentas y sedentarias.

Un campamento mesolítico en Dinamarca

En una loma pequeña, antaño isla, una excavación poco común ha proporcionado indicios de la rica cultura que floreció en las costas del norte de Europa durante el Mesolítico

T. Douglas Price y Erik Brinch Petersen

¿Qué se puede decir de un grupo que vive de la caza y recolección? Hasta hace poco, la respuesta habitual era que tal grupo sería pequeño, pobre y en movimiento más o menos continuo, en busca de alimento. De este cuadro resulta una rudimentaria organización social del grupo. Tal respuesta, apropiada para muchos de los grupos de cazadores y recolectores, a un tiempo, existentes en la actualidad, se está modificando con los hallazgos de una época que terminó hace unos 5000 años: el Mesolítico. Día a día se ha ido viendo con mayor claridad que durante el período mesolítico (la "Edad de Piedra Media") abundaban esos grupos en formaciones bastante grandes, opulentas y a menudo sedentarias. Es más, aunque se hace difícil reconstruir su organización social, parece probable que algunos de estos grupos se caracterizasen por una considerable complejidad comunitaria.

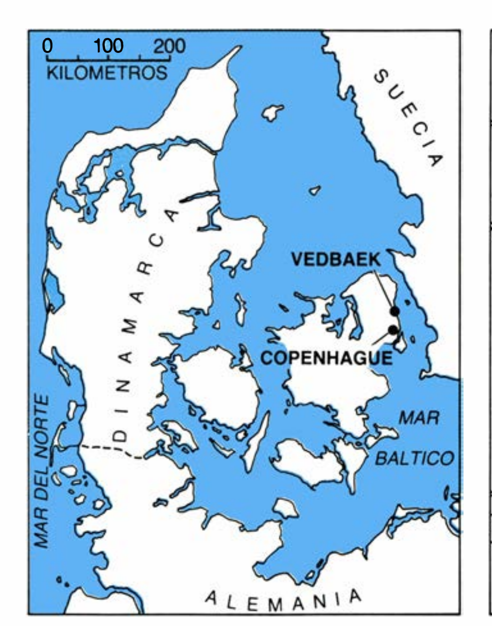
En ninguna parte se advierte este proceso con mayor claridad que en el sur de Escandinavia, donde una combinación de circunstancias favorables ha dado lugar a unos registros arqueológicos de tiempos mesolíticos especialmente ricos e inteligibles. Aquí, el sur de Escandinavia abarca Alemania septentrional, Dinamarca y Suecia meridional; dicha región permaneció en su mayor parte deshabitada hasta hace unos 12.000 años, cuando, a raíz de la retirada de las sábanas de hielos del Pleistoceno, penetraron en la zona las bandas de los cazadores de renos. Más tarde, los cazadores de renos fueron remplazados por una serie de culturas de buscadores [término que designa a los pueblos que aprovechaban, a un tiempo, los recursos de la tierra y del mar]; distinguíanse por su creciente complejidad y por su creciente dependencia de los recursos marítimos. Afortunadamente, la documentación de esta rica secuencia cultural se ha conservado bien en las muchas turberas que se formaron en la región durante y después del período mesolítico.

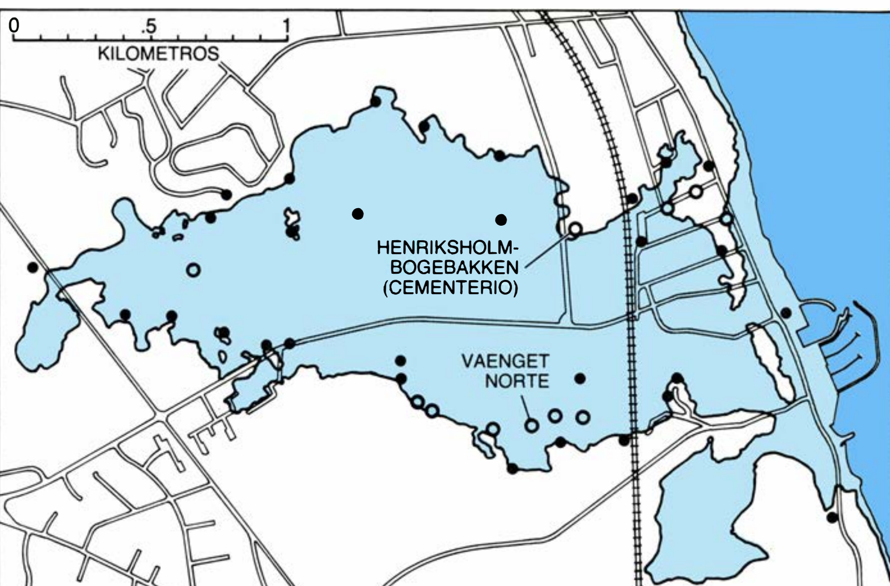
Resultado, en parte, de la excelente conservación de un caudal de utensilios de su cultura, la arqueología constituye una vertiente significativa de la tradición nacional de Dinamarca y de Suecia. Una zona de Dinamarca donde las excavaciones han servido para exhumar un microcosmos de vida mesolítica se extiende alrededor de Vedbaek, pequeña ciudad al norte de Copenhague, en la isla de Zelanda. Durante el Mesolítico había una ensenada cerca del emplazamiento de la ciudad moderna; las excavaciones iniciadas hace 60 años revelaron que la ensenada estaba rodeada de estaciones mesolíticas. En 1975, el descubrimiento de un importante cementerio de ese período despertó un renovado interés en la zona, y en ella se han realizado varias excavaciones de cierta entidad en la última década.

Una de estas excavaciones fue realizada por nosotros mismos en Vaenget Norte. Aunque hoy no sea más que una loma en un prado rodeado de abedules, Vaenget Norte fue en tiempos una isla de la ensenada. Hace cosa de 7000 años, la isla constituía la sede de un campamento pequeño, ocupado estacionalmente varias veces por un grupo de gentes cuyos descendientes habían de habitar en la zona durante los dos milenios siguientes. Desde 1980 hasta 1983, trabajamos en Vaenget Norte. Haciendo uso de la técnica denominada *décapage*, pelamos el suelo capa tras capa, sin remover los útiles de su sitio conforme íbamos poniendo al descubierto la superficie mesolítica. Se trata de un método muy eficaz para reconstruir la organización espacial de los yacimientos prehistóricos. Lo que la organización espacial nos enseñó ha contribuido, a su vez, a nuestra comprensión de la complejidad mesolítica.

Durante gran parte de su prehistoria, el septentrión europeo estuvo cubierto de hielos. Al final del período pleistoceno, hace unos 10.000 años, y como consecuencia de un calentamiento que afectó a todo el globo, se produjeron cambios drásticos de clima y de paisaje. En su retirada, el hielo pleistoceno dejaba nuevos sedimentos con depresiones someras que se convirtieron en lagos y cursos de agua. El nuevo paisaje fue ocupado en un primer momento por especies de tundra: abedules enanos, líquenes, renos y caballos. A estos primeros colonizadores les siguieron rápidamente cazadores humanos pertenecientes a varias culturas del período paleolítico tardío (la "Edad de Piedra Antigua"). Al subir las temperaturas, la tundra dio paso a parques abiertos con predominio de abedules y, finalmente, pinos. Las arboledas se fueron llenando de nuevas especies tales como uros y alces, a los que pronto se añadieron jabalíes, ciervos y corzos.

Los primeros vestigios de cultura mesolítica aparecen en el sur de Escandinavia a comienzos del período posglacial. Los restos arqueológicos datables antes del 7000 a. C. son raros, pero después de esa fecha los buscadores dejan abundantes vestigios de su presencia. (Las fechas utilizadas aquí lo son de radiocarbono sin calibrar, que difieren de las propias del calendario en una cantidad que crece con el intervalo temporal respecto al año 400 a. C. Las fechas no calibradas se pueden ajustar al calendario con ayuda de pinos de piña erizada de edad conocida.)





2. VEDBAEK está en la isla danesa de Zelanda, algo más al norte de Copenhague (*izquierda*). El área es hoy un valle costero de baja cota. El litoral actual y otros pormenores están representados con línea fina en el mapa de la derecha. En el 4000 a. C. el nivel del mar se hallaba cinco metros por encima del actual (*línea oscura*). La ensenada resultante se hallaba densamente poblada durante los períodos mesolítico y neolítico inicial. De las muchas estaciones conocidas de la Edad de Piedra entorno a la ensenada (*puntos negros*), se ha desenterrado una docena (*círculos claros*). Desde 1980 hasta 1983 los autores dirigieron una excavación en Vaenget Norte, que en tiempos mesolíticos era un islote situado a 40 o 50 metros de la costa; se sirvieron de la técnica arqueológica del *décapage*.

Analizando las diversas huellas dejadas por los buscadores, los arqueólogos han podido dividir el Mesolítico del sur de Escandinavia en tres períodos principales. Estos tres períodos cronológicos se conocen como Maglemose, Kongemose y Ertebølle, cuyo nombre deben a su yacimiento más notable. El primer período, el de Maglemose, duró hasta aproximadamente el 5500 a. C. Los cazadores maglemosienses son conocidos principalmente por campamentos pequeños en lagos de tierra adentro, de breve duración, de verano y otoño. Estas comunidades vivían, sobre todo, de la pesca, completada con algo de caza, y de la recolección de avellanas.

La tendencia al aumento de temperatura del período posglacial tuvo importantes consecuencias en el entorno físico de la cultura humana del sur de Escandinavia. Al derretirse las capas continentales de hielo, los mares subieron de nivel. Al mismo tiempo, la corteza terrestre, liberada del peso de una manta gélida de cientos de metros de espesor, empezó a ascender también. A esto siguió una especie de carrera geológica entre la tierra y el mar. Gradualmente, el agua dejó atrás la tierra y el mar subió hasta sobrepasar sus actuales niveles. Hacia el 5000 a. C., la Escandinavia sureña no alcanzaba sus límites actuales, y muchas zonas situadas a bajo nivel, cerca de la costa moderna, habían quedado inundadas.

Los ricos estuarios, ensenadas e islas formados por el mar en ascenso constituyeron el foco del poblamiento humano durante los períodos de Kongemose y Ertebølle. Con el emplazamiento en la costa, el mar se convirtió en fuente principal de subsistencia. La caza, acometida con los medios apropiados en muchas de las islas, contribuyó a exterminar, paulatinamente, osos, uros y alces. Las actividades en busca de sustento se encaminaron al jabalí, al ciervo y muy especialmente al mar. A todo lo largo del mesolítico tardío se advierte una tendencia a que aparezcan en la dieta más especies marinas y a que éstas constituyan la mayor proporción de dicha dieta.

En el mesolítico tardío las culturas costeras comprendían grupos de cazadores y pescadores altamente especializados y adaptados al medio marino. Junto con las capturas de presas exóticas, tales como marsopas y ballenas, estos grupos adaptados al mundo marino explotaban otros recursos del mar más prosaicos: peces y moluscos. En el oeste de Dinamarca se encuentran restos de poblados asociados con frecuencia a montones de conchas de ostras, almejas, caracoles y pechinas (del género *Cardium*). Tales acumulaciones o vertederos de cocina (en danés *køkkenmødding*) no eran las únicas señales de cambio. Los poblados adquirieron mayor tamaño y complejidad y se hicieron más permanentes. Permanencia de los poblados que viene indicada por la aparición de cementerios.

Este proceso se puede observar con nitidez alrededor de la ensenada de Vedbaek, que hoy se halla en tierra firme a unos centenares de metros de la costa. La historia geológica de la zona ha sido cuidadosamente reconstruida por Charlie Christensen, del Museo Nacional de Dinamarca. La zona de Vedbaek adquirió su forma actual merced a las deposiciones geológicas de las últimas sábanas de hielo del Pleistoceno. La ensenada misma era, en su origen, un valle, creado por el desagüe del agua glacial derretida bajo la capa de hielo. Cuando éste se retiró, el valle sostuvo un sistema acuífero de lago y curso de agua. Hacia el 5500 a. C., los mares posglaciales en ascensión habían invadido el extremo del valle más próximo al mar, el cual se convirtió muy pronto en una ensenada del Øresund (el estrecho entre la costa este de Zelanda y la costa oeste de Suecia).

Hace siete mil años, la ensenada ofrecía un ambiente muy propicio para la instalación del hombre. Un variado muestrario de especies alimenticias corría a cargo del mar y la tierra. Unas 60 especies de pescado, reptiles, aves y mamíferos han sido identificadas en las estaciones de la zona de Vedbaek por Kim Aaris-Sørensen, del Museo de Zoología de la Universidad de Copenhague. Las 60 especies proceden de todos los ecosistemas: el bosque, los arroyos, lagos, marismas, la ensenada, el estuario y el mar. Entre los animales de bosque predominan el ciervo, el corzo y el jabalí.

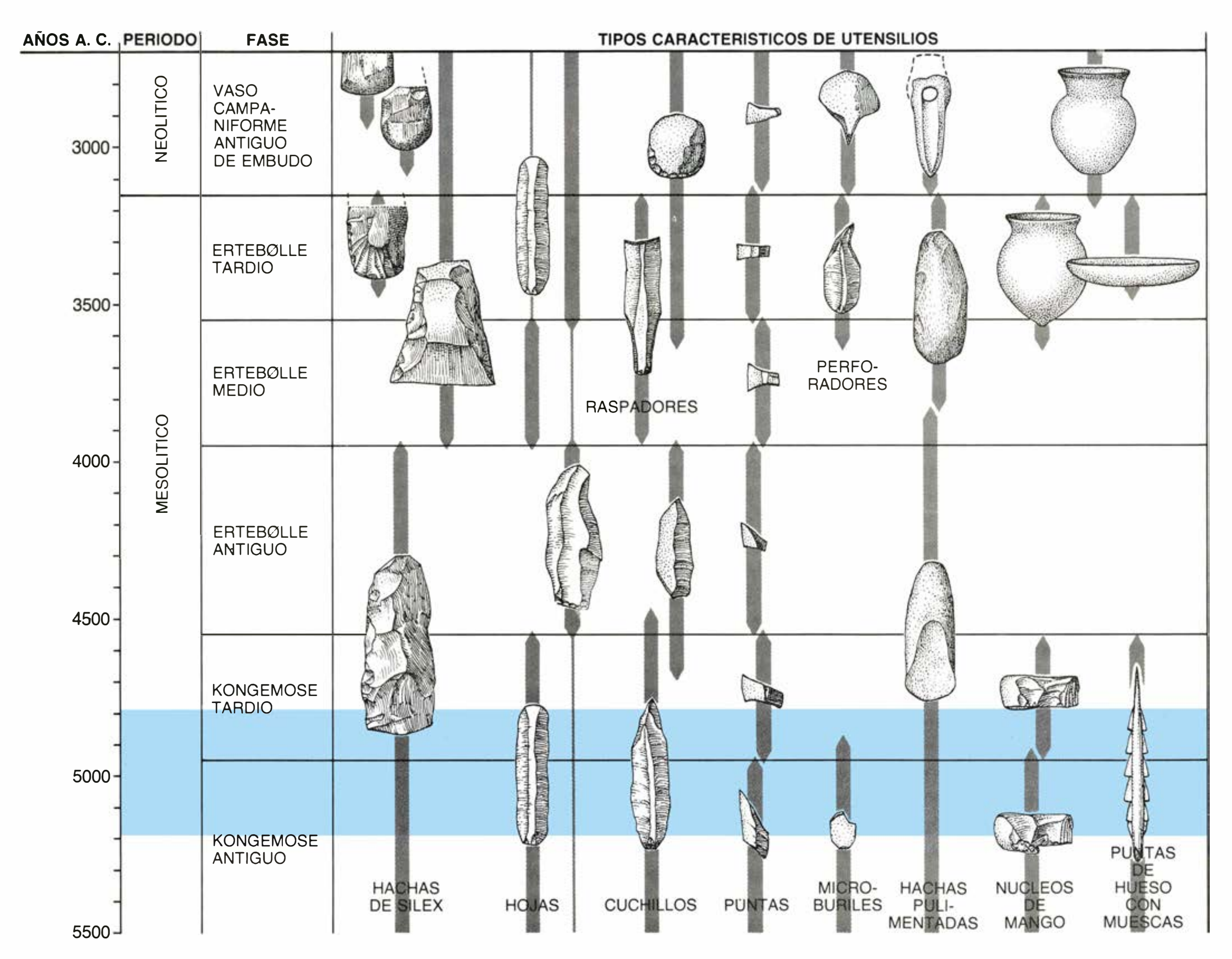
No obstante la diversidad de recur-

sos básicos, los alimentos marinos proporcionan la mayor parte de la dieta. La medición de dos isótopos de carbono (cuyas proporciones varían según la fuente) de huesos humanos indica que los habitantes prehistóricos de la ensenada vivían a expensas del mar en la misma medida en que lo hacen los esquimales actuales de Groenlandia, cuya alimentación se deriva en un 75 por ciento de los recursos marinos. La importancia del entorno marino está acreditada también por los poblados mesolíticos: todos están en las inmediaciones de la línea costera de tiempos prehistóricos.

La riqueza del medio ambiente que rodeaba la ensenada tenía su reflejo en la elevada densidad del asentamiento. Cuarenta yacimientos mesolíticos, o más incluso, se han localizado en las márgenes de la rada, muchos de ellos ocupados repetidas veces durante un largo período. En efecto, los trabajos realizados hasta ahora señalan que las costas de la ensenada fueron ocupadas, por vez primera, por colonos mesolíticos hacia el 5200 a. C., durante la fase de formación de la ensenada. A partir de entonces, se asentaron en la ensenada grupos mesolíticos hasta que la introducción de la agricultura en la zona, alrededor del 3200 a. C., marcó el comienzo del período neolítico (la "Nueva Edad de Piedra").

La repetida ocupación de los yacimientos de la vecindad de la ensenada creó una sucesión vertical, estratificada, de útiles y restos, correspondientes a las subdivisiones cronológicas del Mesolítico. Tal disposición, que los arqueólogos denominan estratigrafía vertical, permite confeccionar una cronología detallada, como la llevada a cabo por Peter Vang Petersen, del Museo Nacional. La cronología de Petersen divide las partes media y tardía del mesolítico representado en Vedbaek en cinco fases, con una duración, cada una, de 400 a 600 años. Cada fase está asociada a tipos distintivos de utensilios, tales como hojas y puntas de piedra [*véase la figura 3*].

Dicha estratigrafía revela algunas cuestiones intrigantes acerca de la relación entre la busca de alimento y agricultura. Varios útiles hallados en los estratos mesolíticos superiores (más tardíos) inducen a pensar que los buscadores estuvieron en contacto con grupos de agricultores a lo largo de un intervalo de unos 500 años, antes de que se adoptase la agricultura en Dinamarca. Tenemos una prueba de ese contacto en la aparición de cerámica, considerada, por lo general, un elemento de la cultura neolítica, en la parte última del registro arqueológico mesolítico. Se diría que los buenos resultados obtenidos por las culturas de buscadores mesolíticos retrasaron la in-



3. CRONOLOGIA MESOLITICA de Dinamarca, establecida mediante el examen de los cambios en los utensilios. Vaenget Norte estuvo ocupada desde el 5200 hasta el 4800 a. C., aproximadamente. Al final del Mesolítico apareció la cerámica, adoptada probablemente de grupos campesinos del sur. La llegada del tipo de cerámica llamada campaniforme de cuello de embudo, hacia el 3200 a. C. (en compañía de plantas y animales domesticados), señala el comienzo del período neolítico. Peter Vang Petersen, concibió este diagrama, si bien en las investigaciones han intervenido asimismo arqueólogos de Europa y América.



4. LA EXCAVACION DE VAENGET NORTE tenía un doble fin: poner al descubierto áreas extensas del antiguo islote y abrir trincheras profundas a partir de su costa. En primer término se ve una trinchera; el grupo que está trabajando en su interior y en sus proximidades examina el corte de la pared de la misma, con ayuda de palillos que indican la sucesión vertical de los niveles por debajo de la superficie actual.

troducción de la agricultura en el sur de Escandinavia durante varios siglos, en los que las faenas del campo, aunque conocidas, no se adoptaron allí como medio de vida [véase "Busca de alimento en los bosques de la Europa posglacial", por Marek Zvelebil; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1986].

Aunque la zona de Vedbaek ha sido objeto de investigaciones arqueológicas durante varios decenios, su importancia se vio acrecentada en 1975 con el descubrimiento del cementerio mesolítico, remontado al 4000 a. C. por las técnicas de datación del radiocarbono. El cementerio encierra tumbas de por lo menos veintidós personas, entre ellas ocho varones adultos, otras ocho hembras adultas y cinco niños. Los enterrados estaban adornados de manera diversa. Un niño estaba sepultado sobre el ala de un cisne, al lado de su madre. Cuernos de corzo se depositaban junto a las personas mayores. Los varones eran inhumados con cuchillos de pedernal; las hembras, a menudo, con bisutería de conchas y dientes de animales. Algunos de estos dientes –incisivos de osos, uros y alces– proceden de animales extinguidos en la zona por aquella época; probablemente se obtenían por intercambio con Suecia central o septentrional, o con Europa continental.

El descubrimiento del cementerio estimuló un renovado interés científico por la zona de Vedbaek como foco de una labor de equipo encaminada a describir y explicar los cambios de una sociedad cazadora-recolectora en el este de Zelanda desde el 5500 al 3000 a. C. Las instituciones colaboradoras están integradas por el Instituto de Arqueología Prehistórica y el Museo de Zoología de la Universidad de Copenhague, el Laboratorio de Antropología de la Universidad de Cambridge, el Museo Nacional de Dinamarca y los departamentos de Antropología de la Universidad de Wisconsin en Madison y de la Universidad de Winnipeg. Las principales excavaciones del proyecto se han realizado en yacimientos que fueron repetidamente ocupados, puesto que en ellos el estrato cultural es del máximo espesor. La residencia reiterada, sin embargo, tiende a emborronar y obscurecer los datos sobre la sucesión horizontal de una estación: situación de edificios, distribución de los hogares, fosas, útiles y desperdicios.

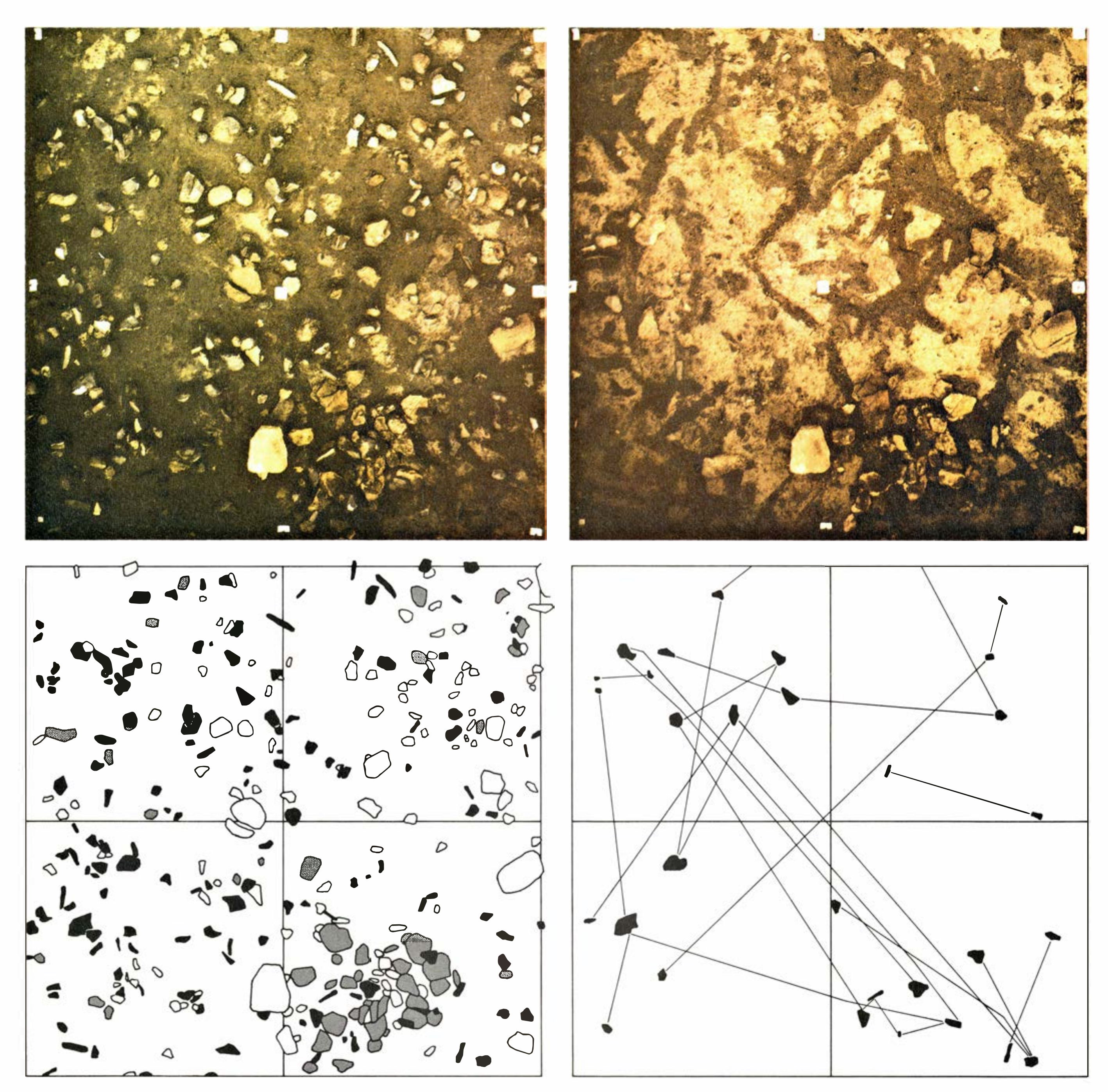
Aun siendo así, parecía que la disposición espacial de un poblado podría aportar importantes indicios de la vida y la organización social de sus ocupantes. Por cuya razón, parte del proyecto de Vedbaek dedicóse al desenterramiento de estaciones con restos no mezclados, relativamente, y al examen de su distribución en un plano horizontal. Varios indicios apuntaban a que Vaenget Norte podría proporcionar un buen campo para esa clase de trabajo. La ligera elevación que fue la isla de Vaenget Norte constituye hoy en día una motilla de sólo 2,75 metros sobre el nivel del mar, en una pradera sin apenas desagües y con arboledas de abedules. Los trabajos preliminares demostraron que el yacimiento había estado ocupado durante la época antigua de Kongemose. Como la isla quedó inundada no mucho más tarde, el período de posible ocupación fue breve. De hecho, las calicatas revelaban ya que el número de utensilios por metro cuadrado era escaso en comparación con otros yacimientos de la zona.

Las excavaciones sistemáticas de Vaenget Norte dieron comienzo en el verano de 1980 y continuaron hasta 1983. Arqueólogos daneses y norteamericanos colaboraron en un doble plan de excavación, basado en lo que se sabía acerca de la organización horizontal de muchos yacimientos mesolíticos, donde a menudo se pueden diferenciar tres sectores independientes. El sector de la verdadera ocupación aparece siempre en contacto con la línea de la costa y encierra hogares, fosas y piedra de construcción, aunque pocos restos orgánicos (que no se conservan bien al aire libre). Una zona de desperdicios en el suelo de la antigua ensenada guarda las basuras que los habitantes tiraban al agua, incluidos huesos, astas de ciervo y pedernal. La zona de desperdicios puede contener también postes, trampas de pesca y otros objetos de madera. En algunos yacimientos hay una zona de arena entre las áreas de ocupación y de vertedero que ha sido limpiada de utensilios por la acción de las olas.

La doble estrategia de excavación de Vaenget Norte pretendía poner al des-

cubierto, minuciosamente, tanto la zona de ocupación como la de vertedero. Desde la costa de la antigua isla los excavadores abrieron profundas trincheras para dejar al descubierto la zona de vertedero y poder estudiar en detalle las diversas capas depositadas en lo que fuera ensenada. En la superficie de la isla se descubrieron grandes zonas, sus capas fueron peladas una a una, mientras que los utensilios se dejaban en su sitio, hasta que su posición exacta quedaba registrada. Dado que este *décapage* lleva tiempo (y es por tanto costoso), rara vez se aplica a zonas grandes de un yacimiento. Sin embargo, es uno de los mejores medios de obtener una información pormenorizada acerca del dispositivo horizontal de los utensilios, y ha sido una suerte que la colaboración entre nuestras instituciones haya hecho posible llevar a cabo la excavación horizontal a una escala bastante grande.

En efecto, la mayor parte de la superficie de la antigua isla quedó al descubierto. Durante su ocupación, el islote medía, probablemente, unos veinte metros de largo por diez metros de ancho; de un total de 506 metros cuadrados que exploramos, 226 quedaron expuestos en *décapage* horizontal. Este proceso de pelado puso al descubierto un estrato cultural compuesto de ceniza, carbones y otros desechos, cuyo espesor variaba a lo largo de la



5. DÉCAPAGE: la técnica arqueológica aplicada en Vaenget Norte. Pone al descubierto áreas extensas de la antigua superficie de habitación. Estos cuatro paneles ejemplifican parte de la información que aporta este procedimiento en un cuadrado de dos metros de lado. Cuando la superficie se levanta, los utensilios no se remueven de su lugar para dar fe de su ubicación (*arriba a la izquierda*). Una vez recogidos la mayoría de los utensilios, se ponen de manifiesto las manchas dejadas al cocinar y al realizar otras actividades, incluida la acción posterior de los topos (*arriba a la derecha*). Se clasifican los útiles (*abajo, izquierda*). Algunas de las piedras eran de sílex trabajado (*negro*); otras eran piedras rotas en las hogueras (*gris*); otras, en fin, eran piedras sin alterar (*blanco*). Algunos trozos de sílex se pueden recomponer, lo que demuestra que formaban parte de un solo trozo de piedra que se estaba trabajando (*abajo a la derecha*).

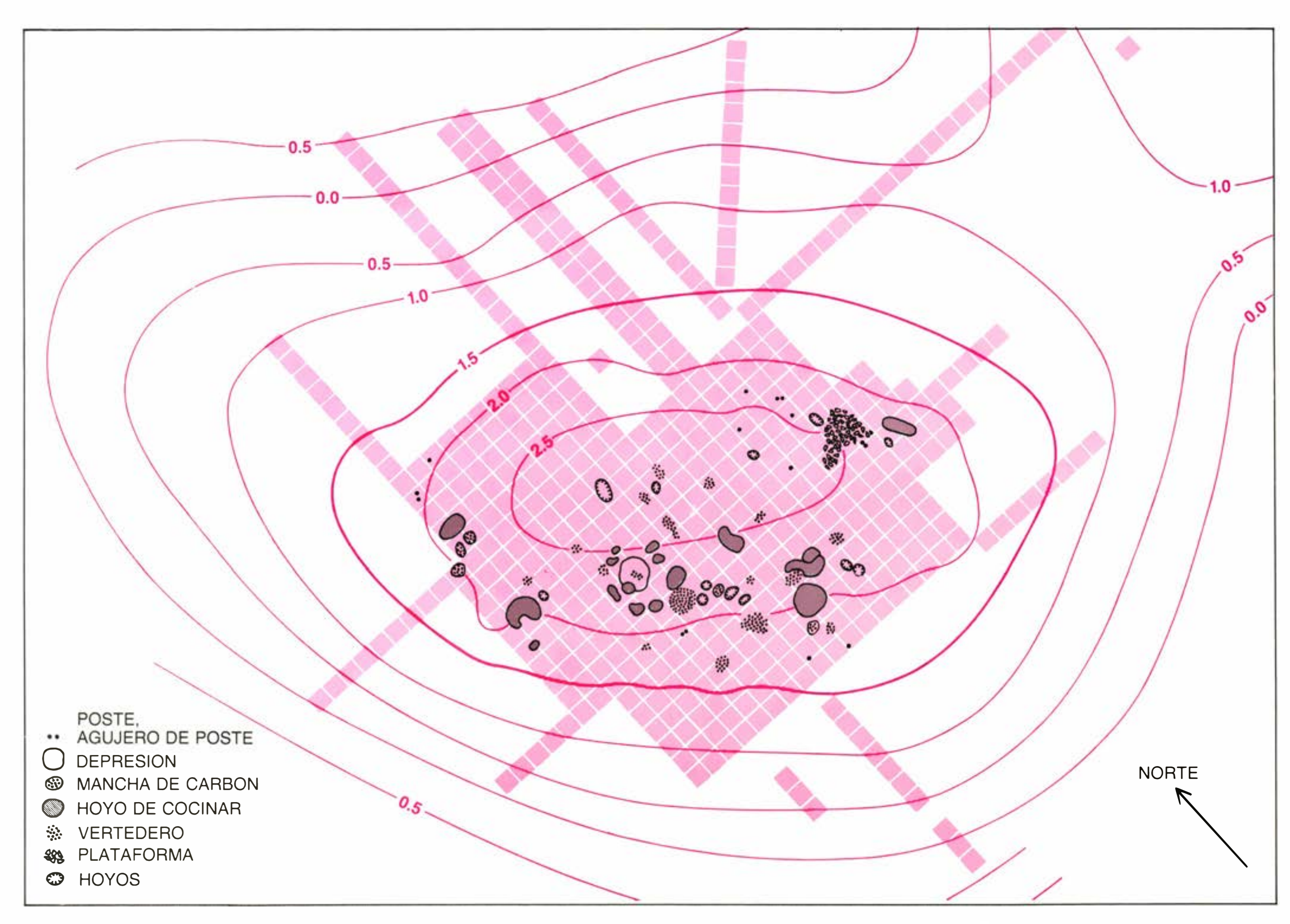
isla. Bajo esta capa, los indicios de actividades humanas (cavar, hacer hogueras e hincar postes) se han conservado en manchas que ennegrecen la arena clara de la superficie de la isla. Nuestra técnica permitía el registro adecuado de la posición de todos estos restos. Además, la tierra recogida de la superficie fue tamizada en agua para obtener el carbón, hueso, pedernal y restos de plantas que eran demasiado pequeños para su identificación *in situ*.

El levantamiento del estrato que contenía útiles reveló muchas alteraciones de la superficie, hogares y hoyos, por ejemplo. Estos elementos se concentraban en la parte suroeste de la isla, la más próxima a tierra firme, que en la época de la ocupación se hallaba a sólo 40 o 50 metros de distancia. Parecía claro que el lado de la isla que miraba a tierra constituía la zona de ocupación. En los márgenes del sur y del este de la zona de ocupación hay áreas donde se partieron grandes pedruscos, cuyos fragmentos se colocaron en el suelo formando una suerte de acera pequeña. A través del área de ocupación, también se encontraron bases de postes de madera. Los postes, de abedul o de aliso, tenían un diámetro de hasta 30 centímetros y acababan en punta. Algunos de ellos pueden ser restos de construcciones de época posterior relacionadas con la pesca.

El análisis de los restos y útiles nos ha permitido dividir la zona de ocupación en varias unidades menores con funciones diferentes. En la parte occidental de la isla se halla la zona de posible habitación (u ocupación primaria). Su elemento más notable es una depresión grande y somera, resultado, quizá, de pisarla repetidamente. Un denso grupo de hoyos de postes en sus proximidades puede haber continuado alrededor de la totalidad o de parte de la depresión. Parece probable que la depresión formase el suelo de una morada. Es poco lo que se sabe, sin embargo, sobre las habitaciones mesolíticas, y por ello no es posible asegurar que fuera una tienda hecha de pieles o una cabaña de mayor entidad, de troncos o de turba.

Además del área de habitación, había por lo menos otras dos áreas de actividad especializada dentro de la zona de ocupación; la distribución de los útiles de sílex prestaba una ayuda inestimable para delimitarlas. La totalidad de las piezas de sílex puede dividirse en utensilios determinados, por una parte, y en productos de desecho, materiales en bruto y otros elementos de producción, por otra. El desecho, al que los arqueólogos suelen referirse con la palabra francesa *débitage*, comprende núcleos de los que se han hecho lascas y hojas, lascas para dar forma a núcleos, y gran cantidad de esquirlas o añicos, resultantes del martilleo de los núcleos. En algunos casos, las piezas pueden recomponerse, con lo que proporcionan información acerca de la manufactura y el desecho del material.

En cuanto a los útiles, los hay de varios tipos: hachas, puntas de flecha, raspadores y buriles (útil con un filo parecido al de un cincel). Las hachas, de



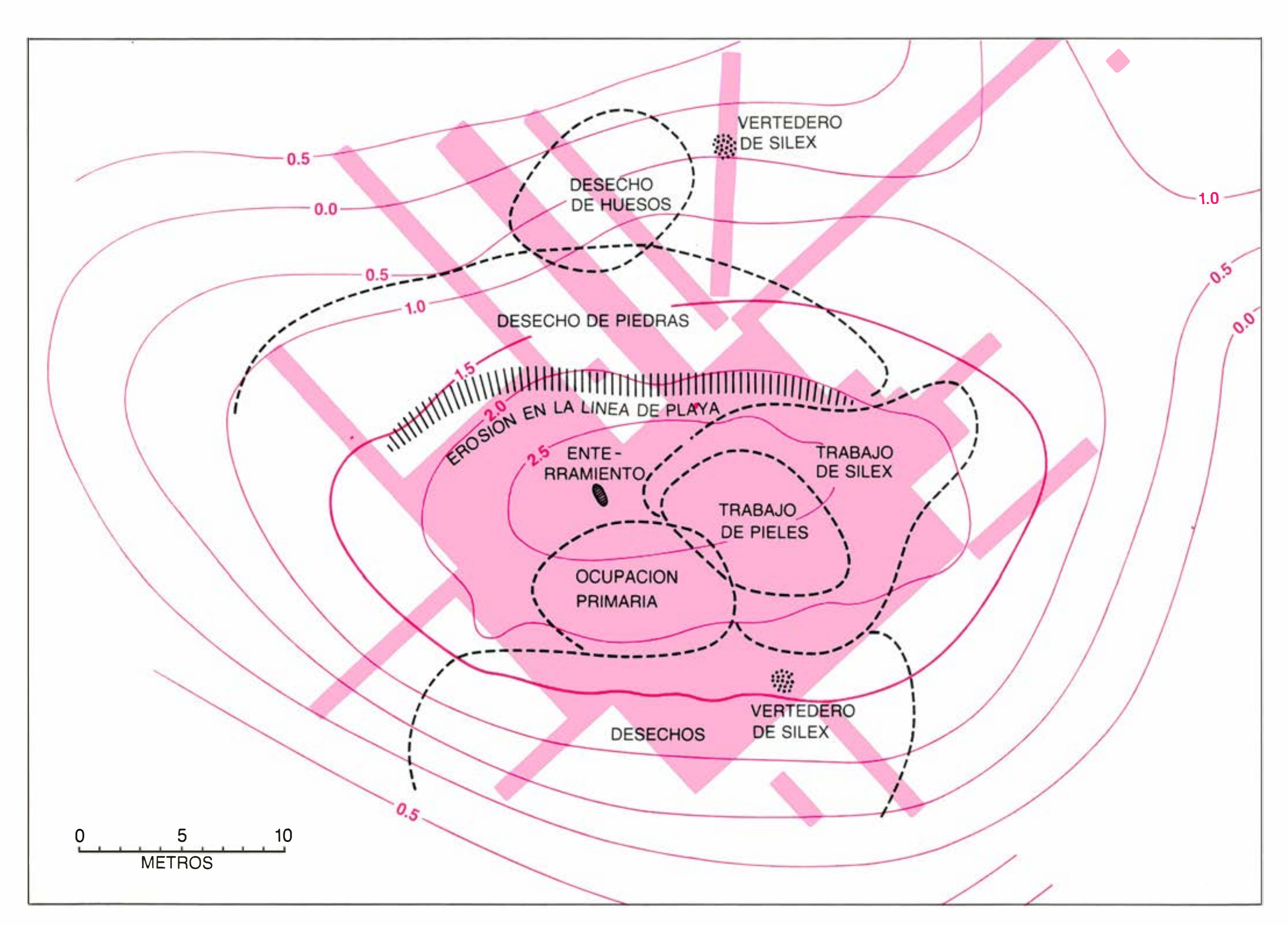
6. PLANOS DEL YACIMIENTO DE VAENGET NORTE que nos muestran utensilios y modificaciones de la superficie de habitación (*izquierda*), junto con áreas de actividad especializada. En el 5000 a. C. el contorno de la isla estaba definido por la curva de 1-5 metros. Una depresión al suroeste de la isla pudo haber sido la base de una vivienda. Hay en ella hoyos de cocinar y otros, así como manchas de carbón, postes y señales de vertidos. En la parte oriental de la isla,

un kilo de peso o más, se hacían arrancando lascas de un pesado núcleo de sílex hasta obtener una herramienta alargada, con un filo ancho y cortante. Después, se unían a mangos largos, de olmo o de fresno. Las hachas podían afilarse arrancando de través una sola lasca grande del filo principal. Las puntas de flecha presentan generalmente forma de rombo. Los buriles y raspadores se hacían de hojas y lascas de sílex, dándole a la piedra el borde apropiado. (Las hojas se distinguen de las lascas porque su longitud dobla, por lo menos, la anchura.)

El conjunto de los útiles de sílex de Vaenget Norte está dominado por las hachas, las puntas de flecha y los buriles; escasean los raspadores. Se suponía tradicionalmente que los buriles servían para grabar motivos varios en el hueso y otros materiales, mientras que los raspadores se empleaban en las pieles de animales. Para comprobar estos supuestos, confiamos los útiles de sílex de Vaenget Norte a Helle Juel Jensen, del Instituto de Arqueología Prehistórica de la Universidad de Århus. Jensen examinó los filos al microscopio, en busca de las señales características de desgaste producido por distintos materiales [véase "Los usos de los instrumentos de sílex del Paleolítico", por Lawrence H. Keeley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1978]. La investigación de Jensen confirmó nuestros supuestos sobre los usos a que los utensilios se habían sometido: los buriles se habían empleado para trabajar y alisar el hueso, los pocos raspadores existentes en el yacimiento habían servido para curtir pieles secas y las hachas de núcleos mostraban el intenso pulimento de la madera a lo largo de su filo cortante.

Con esta información nos encontrábamos en condiciones de continuar cartografiando las áreas de actividad de la isla. La mayor parte de las herramientas de trabajo del hueso se encontraban en el área primaria de ocupación, y aunque las puntas de proyectiles estaban diseminadas por todo el yacimiento, su máxima densidad aparecía también allí, indicando que los habitantes hacían objetos de hueso e instrumentos de caza en sus viviendas o cerca de ellas. Inmediatamente al nordeste de la zona de ocupación primaria, se encuentra el área donde aparecieron la mayoría de los raspadores, en compañía de piezas truncadas y de hojas no retocadas de sílex. Pocos elementos de superficie se encuentran aquí, de modo que es probable que ésta fuese un área donde las pieles se extendían y curtían en el suelo. Rodeando y superponiéndose al área del trabajo de las pieles, hay una zona que parece haber sido escenario de una intensa manufactura de sílex; de ella procede la mayoría de las esquirlas que se han podido recomponer.

Las áreas superpuestas dedicadas al trabajo de la piel y del sílex (además del área de ocupación primaria) completan la lista de los componentes principales de la zona de ocupación. Al sur de la zona de ocupación, se halla un vertedero de desechos; se caracteriza



trozos de roca formaban una tosca pasarela pavimentada. Con testimonios tales y restos de otros artefactos los autores han reconstruido las áreas de las actividades del yacimiento. La zona de ocupación incluye un área primaria de ocupación donde se alzaba la vivienda y áreas para el trabajo de la piel y del sílex. Alrededor de la isla había vertederos de desechos. (La labor realizada en Vaenget Norte ha contribuido a valorar la riqueza de las culturas del Mesolítico.)

éste por un estrato cultural muy grueso, oscuro y con abundancia de carbón y de huesos destrozados por el fuego, aunque pobre en esquirlas de sílex, muy dispersas además. La mayor parte de este área carece de elementos de superficie, y la capa de desechos presenta su mayor grosor en las cercanías de la zona de ocupación primaria.

Al norte, en el lado opuesto de la isla, hay una segunda zona de desperdicios que tenía dos sectores, cada uno de ellos con un contenido algo diferente. La presencia del primer subsector fue denunciada al principio por una elevada densidad de útiles de sílex. Una cuidadosa labor estratigráfica puso de manifiesto que algunos de ellos habían sido arrojados a la que estaba considerada ya como zona de vertedero, mientras que otros habían venido a parar a ella con posterioridad y como efecto de la erosión. Justo al norte de este sector, encontramos un área pequeña donde huesos y cáscaras de nueces habían eludido tanto la erosión como la descomposición. Abundaban las cáscaras de avellana, de la que es sabido que fue un alimento básico para algunos grupos mesolíticos. Entre los huesos están los de varias especies acuáticas, como la aguja, el escombro, el tiburón, e incluso la raya de aguijón, amén de la fauna normal de bosque.

Otro rasgo importante de Vaenget Norte es la fosa funeraria, aislada y enclavada en la parte más elevada del islote delante de la zona de ocupación primaria. Vacía, la fosa carecía del pigmento de ocre rojo que se encontraba en muchas de las tumbas excavadas en 1975. Sin embargo, parece probable que la fosa fuera en su tiempo una tumba, pues su tamaño y su contenido (una hoja pesada de sílex y dos hachas de núcleos) era semejante al de otro enterramiento descubierto antes en una estación próxima. La descomposición ha hecho desaparecer la parte orgánica de la sepultura, dejando sólo el sílex, menos destructible.

Los tipos de utensilios que hemos encontrado en Vaenget Norte, combinados con nuestra reconstrucción de las áreas de actividad en la misma, nos permiten hacer algunas consideraciones generales, a título de hipótesis, acerca de las funciones del yacimiento. La isla era el centro de una serie de actividades interrelacionadas. Entre ellas estaban las manufacturas y reparación de útiles y de armas (como lo demuestran las puntas de flecha) y el descuartizado de animales (como lo evidencian los huesos y el pulimento de algunas hojas de sílex producido por la carne). Terminada la labor de carnicería, algunos subproductos animales eran aprovechados para hacer utensilios y otros bienes de equipo. Algunos de estos artículos eran de hueso (como lo indican las marcas de uso de los buriles), otros eran de piel (como lo prueban los raspadores y hojas) y otros, en fin, de asta de ciervo. La presencia de hachas de núcleo confirma que en el yacimiento se practicaba el trabajo en madera, pero la proporción de herramientas para esa labor es relativamente baja comparada con la de otras estaciones mesolíticas.

¿Qué género de vida pudo haber dado lugar a este cuadro de actividades? Para responder, conviene tener presente que el litoral próximo de la ensenada estaba densamente poblado. Por ello parece lógico pensar que Vaenget Norte era un lugar de acampada temporal. El tamaño del islote indica que acaso sólo entre cinco y diez personas vivieran allí en un momento dado. Es más, los indicios recogidos en el yacimiento indican que la isla sólo estuvo ocupada unas cuantas veces, en episodios que duraban sólo parte del año. No es posible determinar con precisión las estaciones en que esos asentamientos se producían. (Es de saber que la ensenada estaba ocupada durante todo el año.) Aun así, cabe observar que las avellanas, que se encontraron en la isla, maduran en otoño, y que las especies acuáticas halladas en el yacimiento suelen hacer acto de presencia en primavera y principios de verano.

Así, pues, comienzan a encajar algunas de las piezas. Parece posible que lo que hemos exhumado en Vaenget Norte sea un campamento estacional –ocupado en los meses más cálidos–, donde los habitantes de una comunidad de buscadores de alimento, establecida en el litoral de la ensenada, llevaba a cabo tareas especializadas. Entre éstas figuraban el descuartizado y el desuello de animales, faenas molestas que bien podían hacerse allende el asentamiento principal. La materia prima venía tanto de la tierra como del mar, seguramente con predominio del mar. La isla serviría de muelle y base para las reparaciones del equipo utilizado en la caza.

Los episodios de la ocupación de Vaenget Norte debieron sucederse en un período bastante limitado. Las fe-



7. POSTE DE MADERA, uno de varios, hechos de aliso, excavados en Vaenget Norte. Este en particular mide 30 centímetros de diámetro (cada segmento de la escala mide 20 centímetros). Se utilizaban hachas de piedra para dotar al poste de una punta que permitiese hincarlo en los sedimentos de la isla. Tales postes, que alcanzarían unos dos metros o más desde el nivel del suelo, constituirían la armadura de plataformas.

chas de radiocarbono obtenidas en la isla van del 5200 aproximadamente al 4800 a. C. Algunas de las fechas más recientes fueron proporcionadas por cuatro pares de grandes postes hincados en la zona de ocupación; quizá constituyan restos de armaduras o de plataformas relacionadas con la pesca u otras actividades acuáticas. Es posible que estas construcciones no se levantasen durante la ocupación principal de la isla. El nivel del mar continuaba subiendo, y la isla quedó sumergida no mucho después del 5000 a. C. A partir de entonces, pudo transformarse de lugar de habitación en un rico caladero de pesca, como parece indicar el descubrimiento de una canoa labrada en un tronco, aplastada y descompuesta, que estaba amarrada allí hacia el 3700 antes de Cristo.

Tampoco cesaron los cambios sufridos en el entorno cuando la isla quedó sumergida. Como advertíamos más arriba, la retirada de las sábanas de hielo del Pleistoceno produjo el ascenso de las masas de tierra que habían estado cubiertas. Esa subida aún continúa, si bien a un paso mucho más lento, y es más pronunciada donde el hielo era más grueso: en el mar Báltico superior, entre Suecia y Finlandia. Dinamarca septentrional, que estaba más próxima al centro, prosigue en su ascenso del mar con mucha lentitud, desplazando hacia el interior a lugares que un día se hallaron en la costa. Como consecuencia, Vaenget Norte ha vuelto a ser tierra firme.

¿Cuál es en líneas generales la importancia de las investigaciones en Vaenget Norte? Quizá la contribución más importante sea el mapa de las áreas de actividad, una de las parcelaciones más precisas de que se dispone de ningún yacimiento mesolítico. Debido a la ocupación limitada de la superficie de la isla, ha sido posible observar muy pronto distintas zonas que fueron escenario de actividades específicas. Estos cuadros suelen aparecer oscuros en yacimientos con ocupaciones más dilatadas e intensas. La isla misma formaba parte de una comunidad sedentaria de la costa; tales comunidades son ejemplos de la complejidad de la sociedad humana de la Escandinavia meridional inmediatamente antes de la introducción de las explotaciones agrarias. En suma, la labor realizada en Vaenget Norte ha contribuido a la creciente apreciación de la complejidad de los yacimientos arqueológicos y de la riqueza de las culturas costeras que florecieron en el momento en que la agricultura iba a llegar a la zona norte de Europa.

Juegos matemáticos

Las sutilezas de los anillos mágicos, último hallazgo de Ernö Rubik, genial inventor del cubo diabólico

Wolfgang Glebe

Ernö Rubik, profesor de arquitectura y diseño de la Escuela de Diseño Aplicado de la Universidad de Budapest, ha vuelto a la carga. Conocido en todo el mundo gracias a un invento genial, el "cubo" de su nombre, del que se han vendido 185 millones de unidades, Rubik ha concebido otro rompecabezas diabólico. Puede tal objeto llevarnos al borde de la desesperación; empero, el estudio razonado de su estructura nos proporciona un doble placer: la comprensión indolora de la teoría de grupos... y la resolución del rompecabezas.

Contrariamente a las numerosas imitaciones y variantes del cubo húngaro, los anillos mágicos constituyen un rompecabezas enteramente nuevo, tanto en su forma como en su mecanismo [*véase la figura 1*]. El ingenio consta de ocho piezas cuadradas de plástico, que recuerdan a una tableta de chocolate, capaces de girar en torno a algunos de los lados.

Aunque a primera vista sean de aspecto sencillo y obvio, los anillos mágicos tienen en realidad una estructura interna extraordinaria. La diversidad de formas tridimensionales que se obtienen por repliegue de los cuadrados es asombrosa: cajitas, bancos, pirámides, estrellas, etcétera. Durante nuestras manipulaciones, los cuadrados adyacentes se separan y vuelven a reagruparse como por encantamiento. De pronto, un par de piezas sólidamente trabadas se liberan y pivotan en torno a uno de sus lados, que actúa a manera de bisagra; adoptan nuevas configuraciones y quedan ancladas por lo que aparenta ser una "fuerza magnética", de la que sin embargo pueden zafarse para emprender nuevos viajes.

Lo mismo que en el cubo, Rubik ha logrado que el dispositivo mantenga buena cohesión sin que los diversos elementos del ingenio –los cuadrados– se vean forzados a conservar posiciones invariables. Durante los movimientos de las piezas las conexiones no cesan de cambiar, y ésa es una de las razones de que el rompecabezas resulte, a la vez, tan fascinante y versátil.

Los ocho cuadrados están enlazados por 16 hilos de nylon, alojados en los surcos que tallan sus caras: en las caras de cada pieza hay ocho surcos, dispuestos en dos grupos diagonales de cuatro surcos cada uno. Cuatro surcos paralelos a una de las diagonales están vacíos, mientras que los otros cuatro alojan a un hilo cada uno. De ese modo, cada pieza queda unida a dos vecinas por dos pares de hilos.

Cuando se pliega un cuadrado sobre otro, los surcos de sus caras quedan en coincidencia; los hilos pueden así pasar de los surcos de la cara de un cuadrado a los de la cara del otro. Queda establecida entonces una nueva conexión, por medio de uno de los lados adyacentes a la bisagra inicial; la nueva bisagra forma ángulo recto con la precedente.

Las caras de las piezas llevan pintadas franjas curvas con los colores del arco iris. En el estado inicial del rompecabezas las franjas formas tres anillos elípticos; en su cara opuesta las franjas no forman ningún motivo coherente, y se intuye ya que el problema consistirá en obtener también aquí tres anillos.

En efecto, la tarea que se le encomienda a quien se atreva con el rompecabezas es reordenar las piezas de tal modo que en la cara dorsal se configuren también tres anillos (desapareciendo con ello los iniciales). Los nuevos aros se distinguen de los primeros en que aparecen ingeniosamente entrelazados.

Pero sobreviene una nueva dificultad: los anillos entrelazados no surgen en la disposición rectangular de las piezas (de 4 × 2), sino en la cuadrada (de 3 × 3), en la que, por haber sólo ocho piezas, falta una esquina.

Antes de enfrascarnos en el intento convendrá someter a análisis la configuración rectangular. Para seguir con mayor comodidad las traslaciones y giros de las piezas, numeraremos los cuadrados en la posición de partida, como se indica a continuación:

1	2	3	4
5	6	7	8

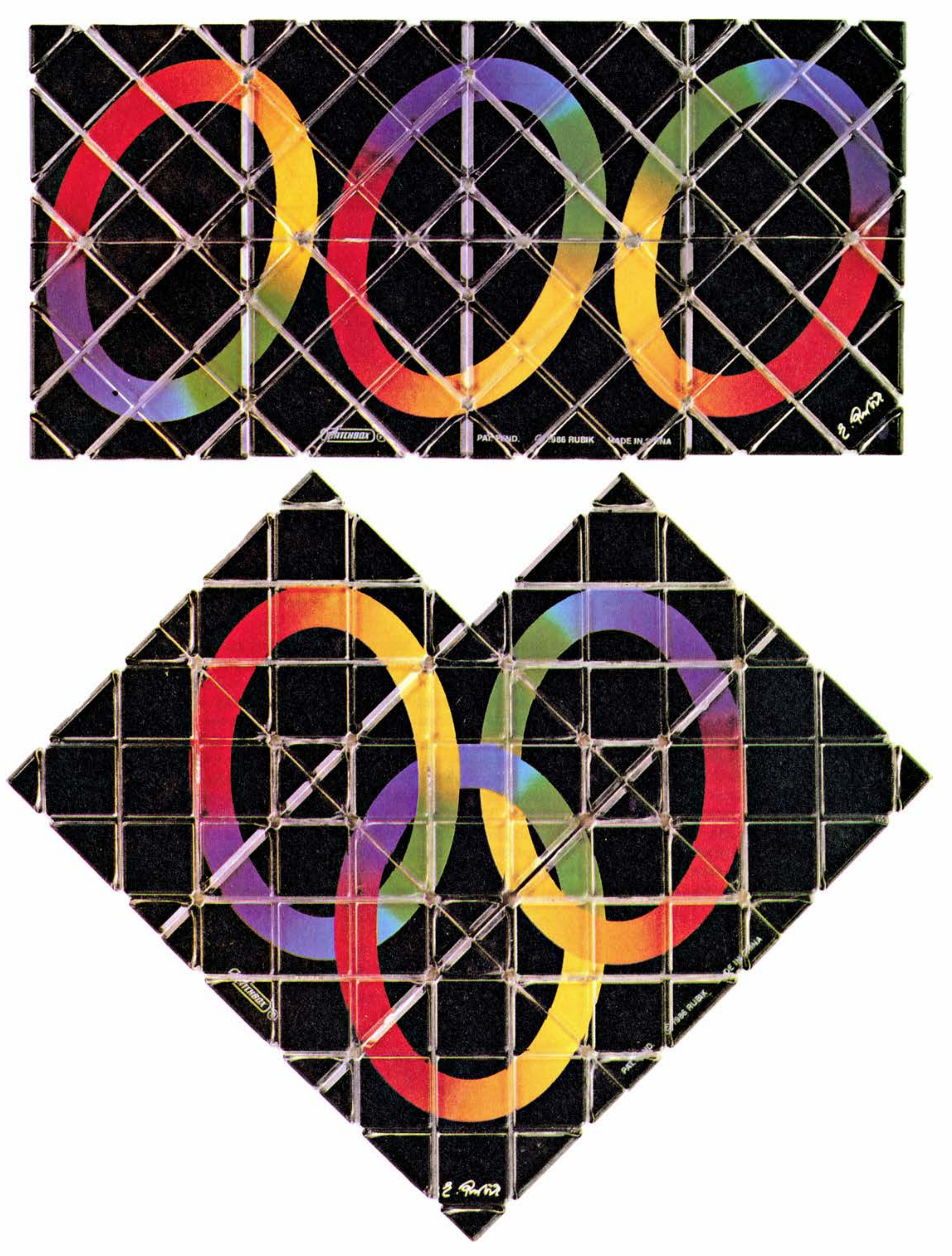
Bastará numerar de ese modo los cuadrados de una de las caras del rompecabezas, porque, como vamos a ver, ningún cuadrado puede pasar de una configuración plana a otra por giro respecto de los demás; es decir, los rótulos que se haya utilizado para marcar las caras se encontrarán siempre en un mismo lado.

¿Cuántas configuraciones de la disposición de 4 × 2 existen y cómo se llega a ellas a partir del estado inicial? Todo cambio de lugar de los cuadrados puede interpretarse, en términos matemáticos, como una permutación. Por consiguiente, el número máximo de configuraciones debe corresponderse con el número de permutaciones posibles.

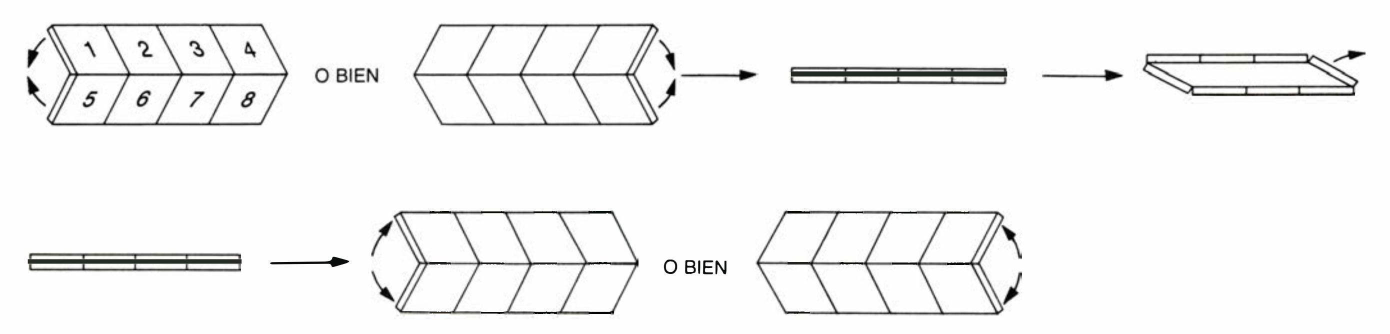
¿Cuántas permutaciones puede alojar una estructura de ocho elementos dispuestos en 4 × 2? Si pudieran intercambiarse sin restricción todos los cuadrados, el lugar del primer cuadrado podría ocuparlo uno cualquiera de los ocho; el puesto del segundo, cualquiera de los 7 restantes, y así sucesivamente, lo que da un total de $8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 40.320$ configuraciones posibles.

En el razonamiento anterior hemos supuesto que todos los cuadrados conservaban su orientación, pero sabemos que no es así, y que los cuadrados pueden pivotar en ángulo recto durante las manipulaciones. Puesto que cada cuadrado puede adoptar cuatro orientaciones independientes, el número total de configuraciones sería de $4^8 \times 40.320$, es decir, ¡2.642.411.520! Pero como no vamos a distinguir dos configuraciones que sean simétricas respecto a un punto central situado en la intersección de las dos diagonales del rectángulo definido por los ocho cuadrados, el número total de configuraciones quedará cifrado en algo más de 1300 millones.

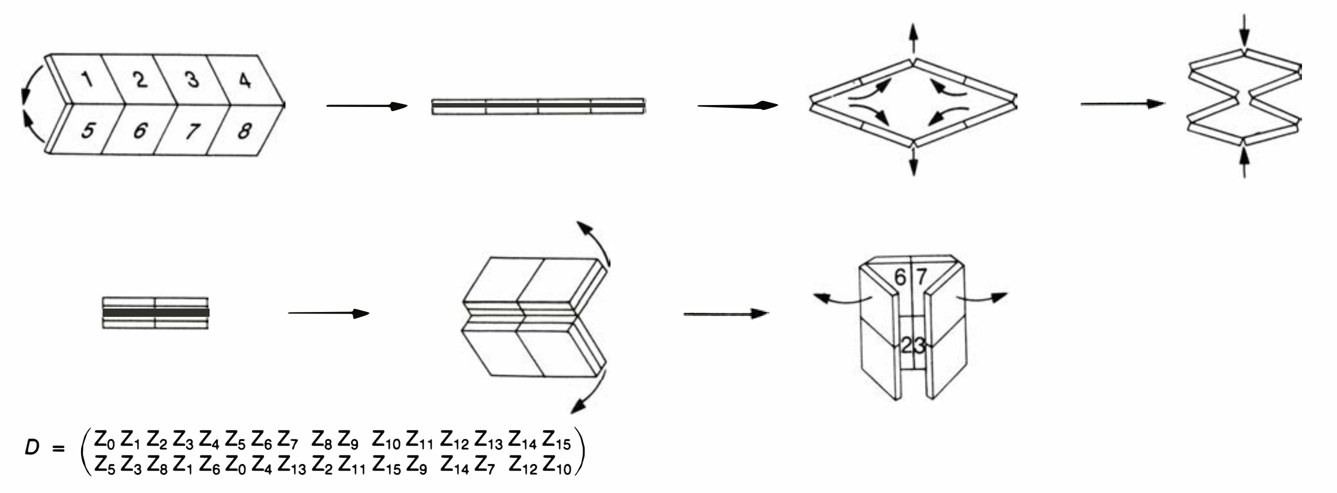
Ahora bien, ¿serán técnicamente realizables la totalidad de las configuraciones anteriores? Repasemos la mecánica del ingenio. Como hemos mencionado, una bisagra puede pivotar 90 grados; aunque parezca lo contrario, ningún cuadrado se despega, sin embargo, de su vecino. Un examen atento revela que el cuadrado vecino se asocia por el otro lado, y que ambas piezas permanecen adyacentes; lo único que cambia es su orientación. Por el contrario, los cuadrados no conectados en-



*1. Los anillos mágicos. Estados inicial (***arriba***) y final (***abajo***)*



2. La transformación **R** *lleva de un estado simétrico a otro asimétrico*



$$D = \begin{pmatrix} Z_0 & Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & Z_6 & Z_7 & Z_8 & Z_9 & Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_5 & Z_3 & Z_8 & Z_1 & Z_6 & Z_0 & Z_4 & Z_{13} & Z_2 & Z_{11} & Z_{15} & Z_9 & Z_{14} & Z_7 & Z_{12} & Z_{10} \end{pmatrix}$$

3. La transformación **D** *permuta las filas superior e inferior*

tre sí, que sólo se encuentren circunstancialmente en vecindad, sí pueden separarse.

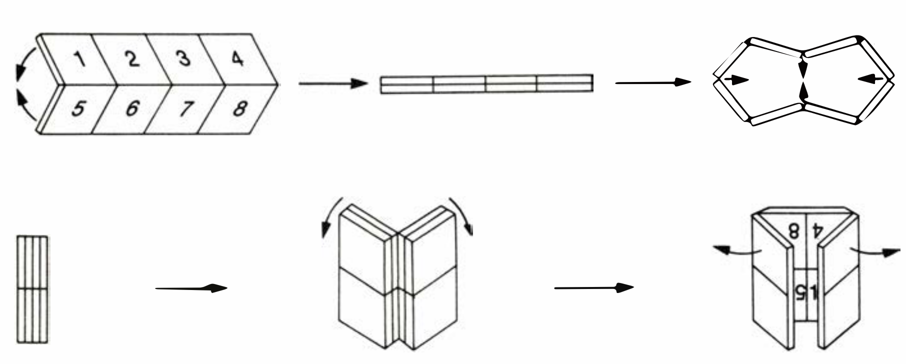
La permanencia de las bisagras asociadas a los pares de cuadrados reduce drásticamente el número de configuraciones planas. Además, el número de las orientaciones respectivas de los cuadrados es limitado. Así, no existe ninguna configuración en la cual ciertos cuadrados no hayan girado y otros lo hayan hecho 90 o 270 grados. Solamente pueden coexistir cuadrados cuya orientación haya cambiado en 180 grados con cuadrados que no hayan cambiado de lugar; es más, ello sólo puede darse por pares.

Resulta extremadamente difícil deducir esa última observación a partir del análisis de las propiedades mecánicas del rompecabezas. En todo caso, se concluye que, de los 1300 millones de configuraciones teóricamente posibles, tan sólo 32 son realizables. De ellas, 16 son simétricas y 16 asimétricas. (Se dice que una configuración es simétrica cuando los cuadrados numerados del 1 al 4 se encuentran, sea alineados, sea dispuestos en cuadro en la mitad izquierda o en la mitad derecha de los 4 × 2 rectángulos.)

Tras esas consideraciones, pongámonos manos a la obra. ¿Qué manipulaciones nos permitirán obtener las 32 configuraciones planas a partir de la configuración inicial? Comencemos por la más sencilla. (1) Repleguemos los cuatro cuadrados de la fila superior sobre los cuatro de la fila inferior. (2) Sujetemos entre el índice y el pulgar de la mano izquierda, por los lados libres, el segundo cuadrado de la mitad superior, contando desde la izquierda, y de igual manera, con la mano derecha, el segundo cuadrado situado directamente enfrente en la fila inferior. (3) Separemos las manos, con objeto de transformar la estructura en una tira. (4) Aplanemos la tira y despleguémosla a lo largo de la bisagra inferior. El resultado debe ser la siguiente configuración:

6	7	8	4
5	1	2	3

De acuerdo con la definición dada antes, se trata de un estado asimétrico. La transformación recién descrita (repliegue, traslación y despliegue), a la que llamaremos R, transforma un es-



$$E = \begin{pmatrix} Z_0 & Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & Z_6 & Z_7 & Z_8 & Z_9 & Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_3 & Z_5 & Z_6 & Z_0 & Z_8 & Z_1 & Z_2 & Z_{11} & Z_4 & Z_{13} & Z_{14} & Z_7 & Z_{15} & Z_9 & Z_{10} & Z_{12} \end{pmatrix}$$

4. La transformación **E** *intercambia las filas superior e inferior y, además, traslada cada cuadrado dos unidades*

tado simétrico en otro asimétrico, y viceversa.

Antes de efectuar transformación alguna debemos asegurarnos de que la cara de la estructura rectangular que mira hacia nosotros sea la que porta los cuadrados numerados. De no ser así debe dársele vuelta. En ocasiones, en el primer paso de una transformación la fila superior debe replegarse hacia atrás, y no hacia delante. En ese sentido, el segundo paso resulta decisivo: si no se acomoda a la manipulación prevista, la fila superior debe plegarse en el paso anterior en sentido contrario. Esa duplicidad del primer paso vale igualmente para las operaciones que veremos a continuación.

¿Qué sucede si efectuamos dos veces consecutivas la transformación R? No ocurre nada: volvemos a la posición inicial. Las transformaciones que, al repetirlas, reproducen el estado inicial se denominan involuciones. Podemos escribir $R \times R = i$, siendo i la transformación identidad, esto es, la transformación que no cambia nada.

Dado que la transformación R pasa de un estado simétrico a otro asimétrico, si supiéramos obtener las 16 configuraciones rectangulares simétricas a partir de la configuración inicial, sabríamos obtenerlas todas. Las denominaré de Z_0 a Z_{15}, donde Z_0 denota la configuración de partida. En la figura 6 se muestran todas las simétricas, salvo la inicial.

El procedimiento expuesto en la figura 3 —la denominada transformación D— ejemplifica la obtención de una configuración simétrica nueva a partir de la de salida. En primer lugar se pliega la fila superior hacia delante (en otras configuraciones de partida habrá que hacerlo hacia atrás), sobre la inferior. Seguidamente empujamos sus dos extremos y tiramos de los centros, para obtener una especie de diamante, que replegaremos en dos pilas de cuatro cuadrados. Abriendo esa forma se obtiene un cuadrado de 2 × 2, de espesor doble, del cual abriremos hacia la izquierda y hacia la derecha las "contraventanas" (en este caso, aunque no sea regla general, es preciso darle la vuelta a la estructura).

Por comparación con la configuración de partida se advierte que la transformación D que acabamos de explicar se limita a intercambiar las filas superior e inferior de la original, lo que nos informa de que se trata también de una transformación involutiva: la repetición de D lleva a la configuración de salida. DD es, pues, la transformación idéntica i; D es inversa de sí misma.

D transforma Z_0 en Z_5 y, Z_5, en Z_0. No proporciona ninguna configuración rectangular más, por lo que deberemos servirnos de otras transformaciones como, por ejemplo, la E, donde, a diferencia de la D, se empujan hacia dentro los extremos superior e inferior del diamante [*véase la figura 4*]. Lo mismo que D, la transformación E intercambia las filas superior e inferior, pero además desplaza cada cuadrado dos puestos en sentido contrario al de las manecillas del reloj. Pasamos entonces de Z_0 a Z_3, y de Z_3 a Z_0, porque, al igual que D, la transformación E es involutiva.

Al ejecutar una tras otra las transformaciones D y E se obtiene la configuración Z_1. No importa el orden: $ED(Z_0) = DE(Z_0) = Z_1$. Las operaciones D y E conmutan entre sí, pero, como se verá de inmediato, tal propiedad no es regla general.

Dado que $D(Z_1) = Z_3$ y puesto que $E(Z_1) = Z_5$, esas dos transformaciones no nos llevan mucho más lejos. Necesitamos una transformación más, que llamaremos F; se detalla en la figura 5.

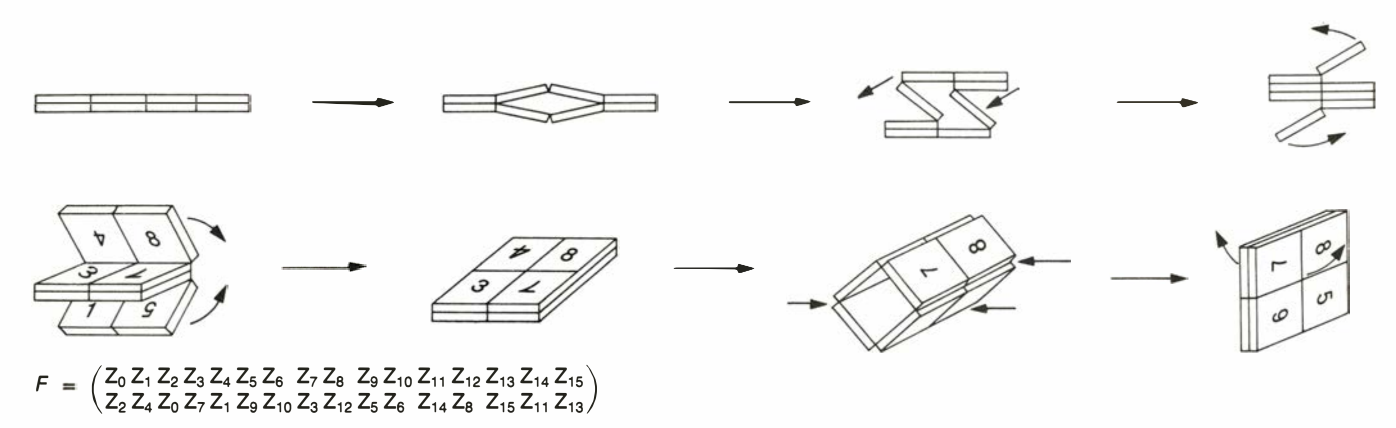
La transformación F consiste en plegar la fila superior sobre la inferior para obtener una estructura en pinza; la empujaremos lateralmente en un movimiento de cizalladura, al objeto de obtener dos pilas de cuatro cuadrados superpuestos. Seguidamente se hacen bascular dos cuadrados, uno por arriba y otro por abajo, como se indica en aquella figura; se despliega la estructura obtenida, formándose un cuadrado de 2 × 2, y se inserta un dedo entre las dos capas, obteniéndose un cilindro, que deformaremos hasta obtener otro cuadrado, como se indica. A continuación se despliegan los lados y ¡se vuelve entonces a la estructura rectangular!

Tras esa sorprendente metamorfosis la apariencia de nuestro rompecabezas ha variado notablemente. No sólo han permutado su lugar las piezas que lo componen, sino que todas aparecen rotadas 90 grados en un sentido u otro. La figura 6 nos confirma que hemos aterrizado en la configuración Z_2.

La transformación F es involutiva, pero no conmuta con D ni con E. En efecto, $FD(Z_0) = Z_9$ y $DF(Z_0) = Z_8$. Dada esa no-conmutatividad, la transformación F presenta mayor capacidad de engendrar configuraciones nuevas que las otras dos; con D y E, constituye un núcleo de transformaciones capaces de engendrar todas las configuraciones rectangulares [*figura 6*].

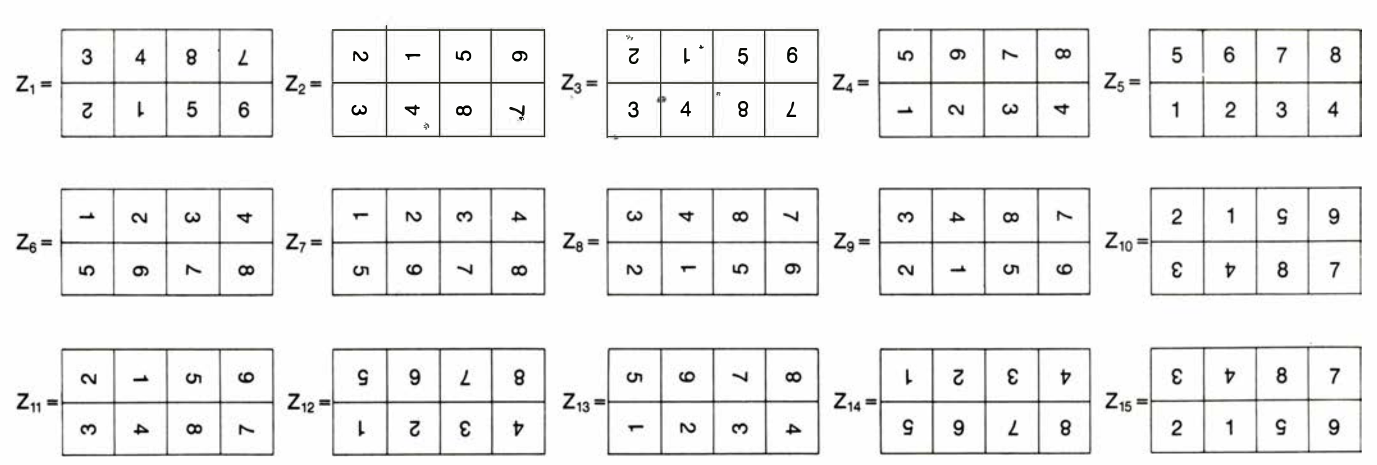
Antes de dar la solución del rompecabezas examinemos los resultados obtenidos a la luz de la matemática. Para generar las 16 configuraciones simétricas se precisan 16 transformaciones, que se construyen a partir de D, E y F. ¿Qué ocurre cuando se aplican secuencialmente dos de esas transformaciones? ¿Obtendremos alguna configuración distinta de las 16? ¡No! Y mejor que así sea, pues de lo contrario se darían más de 16 configuraciones simétricas.

Comprobemos lo dicho sometiendo Z_0 primero a la composición $FDFD$ y seguidamente a la $DFEF$. Como se indica en la figura 6, $FDFD(Z_0)$ da Z_{14}.



$$F = \begin{pmatrix} Z_0 & Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & Z_5 & Z_6 & Z_7 & Z_8 & Z_9 & Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_2 & Z_4 & Z_0 & Z_7 & Z_1 & Z_9 & Z_{10} & Z_3 & Z_{12} & Z_5 & Z_6 & Z_{14} & Z_8 & Z_{15} & Z_{11} & Z_{13} \end{pmatrix}$$

5. La transformación **F** *cambia de lugar todos los cuadrados y los hace pivotar 90 grados*



*6. Las 16 configuraciones simétricas (**izquierda**) y las transformaciones que permiten*

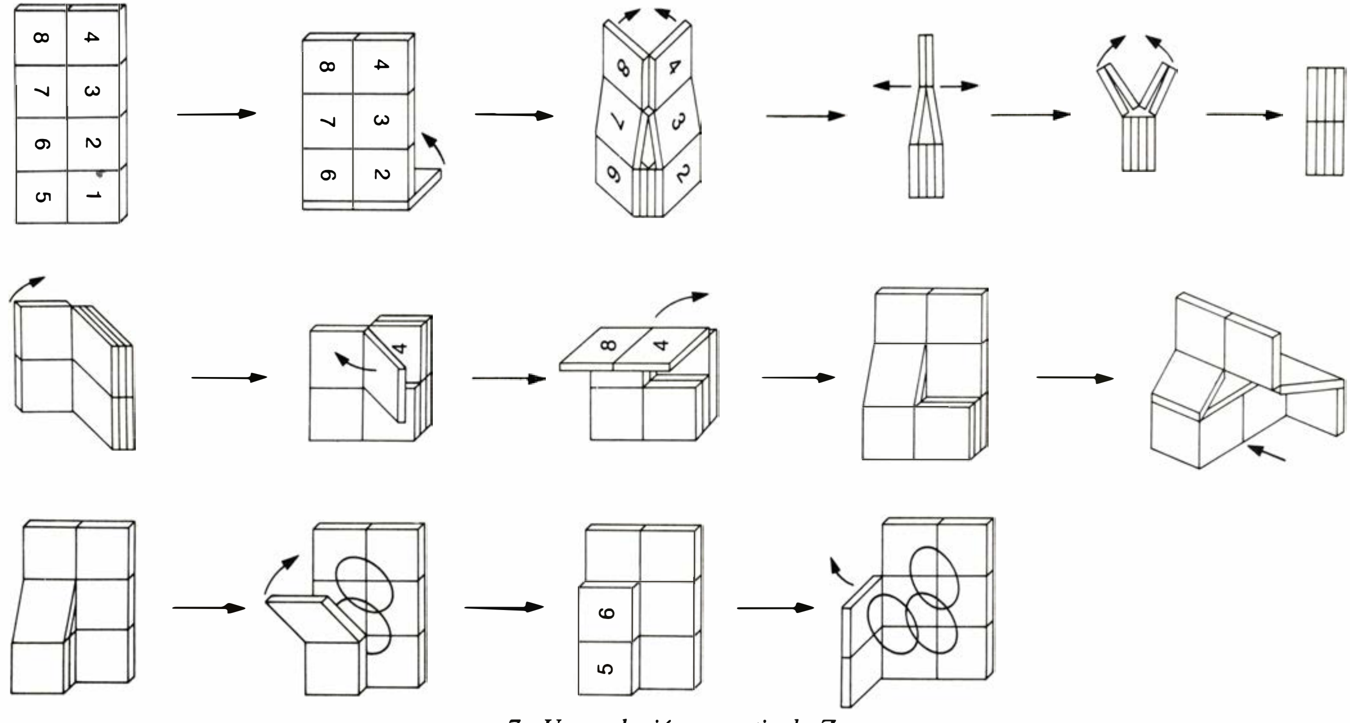
Paso a paso, comprobamos entonces que $F(Z_{14}) = Z_{11}$ y, por consiguiente, que $DFEF(Z_{14}) = DFE(Z_{11})$. De modo similar se comprueba que $DFE(Z_{11}) = DF(Z_7) = D(Z_3) = Z_1$. La configuración final forma parte de las 16 configuraciones rectangulares simétricas.

El conjunto de esas configuraciones es, en terminología matemática, "cerrado", y, por añadidura, satisface otras interesantes propiedades. Por ejemplo, la composición de las transformaciones D, E y F es asociativa; lo que significa que $DEF((FEF)(FDF)) = ((DEF)(FEF))FDF$, y ello porque las propias transformaciones D, E y F lo son. (Así lo dimos por supuesto al describir DEF.)

Finalmente, a cada transformación le corresponde una transformación inversa, que neutraliza sus efectos. Las transformaciones D, E, F son inversas de sí mismas. La inversa de cualquier transformación compuesta se obtiene efectuando las transformaciones componentes en orden contrario; así, la inversa de $DFEF$ es $FEFD$. En el ejemplo citado antes podemos escribir $(DFEF)(FEFD) = DFEFFEFD = DFEEFD = DFFD = DD = i$. Fijémonos, por otra parte, en que DF no es involutiva: $(DF)^2$ no es i. Para vengarnos comprobaremos que $(DF)^4 = i$.

Los matemáticos dicen que tales operaciones forman un grupo que opera sobre un conjunto de 16 elementos. En este caso el grupo no es abeliano, porque la transformación F no conmuta con D y E. Las operaciones D, E, F e i no tienen, en cambio, estructura de subgrupo. Sí existen, empero, los subgrupos siguientes: (i,D), (i,E) e (i,F); así como el subgrupo de las transformaciones que no utilizan F, a saber, (i, D, E, DE), y el de las transformaciones sin E, es decir $(i,F,D, DFFD, DFD, FDF, FDFD)$.

El análisis del número de elementos de cada subgrupo resulta ser divisor de 16 (2, 4 u 8), propiedad general que demostró hace 200 años el matemático Joseph Louis de Lagrange, y que puede enunciarse como sigue: el orden de todo subgrupo (es decir, el número de transformaciones de que consta) es divisor del orden del grupo. Evidentemente, Lagrange no pensaba en Rubik ni en su rompecabezas cuando formuló ese teorema, pero ¿se habrá acordado Rubik de Lagrange?



7. Una solución a partir de Z_{12}

$i\,(Z_0)$	=	Z_0
$DE\,(Z_0)$	=	Z_1
$F\,(Z_0)$	=	Z_2
$E\,(Z_0)$	=	Z_3
$DEF\,(Z_0)$	=	Z_4
$D\,(Z_0)$	=	Z_5
$EF\,(Z_0)$	=	Z_6
$FE\,(Z_0)$	=	Z_7
$DF\,(Z_0)$	=	Z_8
$FD\,(Z_0)$	=	Z_9
$FEF\,(Z_0)$	=	Z_{10}
$DFD\,(Z_0)$	=	Z_{11}
$FDF\,(Z_0)$	=	Z_{12}
$DFE\,(Z_0)$	=	Z_{13}
$FDFD\,(Z_0)$	=	Z_{14}
$DFEF\,(Z_0)$	=	Z_{15}

*llegar a ellas (***derecha***)*

Con ayuda de la tabla de la figura 6 podemos transformar cada configuración en cualquier otra, pasando antes por Z_0. Sin embargo, no necesariamente será ésta la ruta más corta. Quedan pendientes otras muchas cuestiones: (*a*) ¿Cuáles son las dos configuraciones más alejadas, es decir, las que exigen mayor número de transformaciones *D*, *E* y *F* para pasar de una a otra? (*b*) ¿Cuáles son las configuraciones que exigen mayor número de manipulaciones de cuadrados para pasar de una a otra? (*c*) ¿Cuál es la ruta más corta (en número de manipulaciones) que conecta dos configuraciones rectangulares?

Veamos por fin la solución del rompecabezas. Para obtener los tres anillos entrelazados debe partirse de una de las 32 configuraciones rectangulares. Nos valdremos de una sencilla estrategia. Empezaremos buscando una transformación que lleve del rectángulo de 4 × 2 a un cuadro de 3 × 3 que carezca de una esquina. Confesaré que la solución que doy la he hallado al azar, y que quizás exista otra más rápida; se han descubierto ya otras transformaciones que desempeñan la misma función, una de las cuales se debe a mi colega rubikiano Gerhard Trageser. Conocida esa transformación, basta aplicarla a una de las 32 configuraciones rectangulares para estar seguros de obtener la solución. Hemos representado en la figura 7 los pasos que llevan de Z_{12} al resultado; el proceso entero requiere más de 20 manipulaciones. Conozco otras dos soluciones, una que parte de Z_8 y otra de Z_7, de igual longitud que la anterior.

¿Existirá una transformación mejor, más breve, para pasar de Z_0 a la configuración final? Lo ignoro. Esperemos que, igual que ocurrió con el cubo de Rubik, esté a punto de nacer una disciplina nueva, la "magicología".

Taller y laboratorio

Cómo calcular la distancia de un punto al Sol observando la trayectoria de un meteorito

Jearl Walker

La pregunta es ambiciosa y clara: ¿Puede determinarse la distancia al Sol sin necesidad de instrumentos ópticos u otro tipo de aparatos modernos? Joseph L. Gerver, de la Universidad de Rutgers, ha ideado un procedimiento que permite establecer un límite inferior para la distancia media entre la Tierra y el Sol. Y ello sin más que papel, lápiz y regla. Es conveniente, pero no imprescindible, ayudarse de un mapa celeste. Con tan simple instrumental y mucha paciencia Gerver determinó que el Sol se hallaría a unos 65 millones de kilómetros, que es aproximadamente la mitad de la distancia media real, unos 150 millones de kilómetros.

La idea de Gerver estriba en observar un meteorito cuando penetra en la atmósfera terrestre. Los meteoritos, que son restos de cometas o materia procedente de los cinturones de asteroides, se calientan rápidamente al entrar en la atmósfera hasta el extremo de que su resplandor es visible desde el suelo. Casi todos ellos se consumen sin pasar de las capas superiores de la atmósfera.

El método de Gerver consiste en determinar la velocidad de un meteorito con respecto a la Tierra dividiendo el tiempo que dura su fulgor por la longitud de su rastro luminoso. Si el meteorito orbita en torno al Sol, el límite de su velocidad con respecto al Sol está relacionada con la velocidad de la Tierra en torno al astro. Midiendo, pues, la velocidad del meteorito en la atmósfera se puede calcular la velocidad de la Tierra y a partir de ella el radio de la órbita terrestre en torno al Sol.

El método de Gerver hay que ponerlo en práctica durante un período de lluvia de meteoritos. Para ello se tienen que distribuir varios observadores distantes entre sí unas decenas de kilómetros. Cada uno debe registrar la hora y la duración de todo meteorito que aviste y señalar su trayectoria en un mapa celeste. El tiempo que tarda en volatilizarse un meteorito puede calcularse cantando una especie de sonsonete como “ciento uno, ciento dos”, y así sucesivamente para contabilizar segundos. (El tiempo que tardamos en pronunciar cada número equivale aproximadamente a un segundo.) Luego se examinan los datos recogidos para ver si hay algún avistamiento común. Si se encuentra alguno, se pueden emplear las posiciones relativas de los observadores y sus mediciones para calcular la altura del punto final del meteorito, que es el lugar donde acaba su trayectoria visible.

En ese momento, Gerver propone una verificación de los resultados. A partir del punto final calculado y las visuales de cada observador se calcula el rumbo entre los observadores. Si la brújula marca ese rumbo, sabremos que vamos por buen camino.

Observamos los meteoritos sobre la esfera celeste, una enorme estructura imaginaria centrada en la Tierra. Como las estrellas se hallan tan lejanas, parecen encontrarse adosadas a la superficie interior de esa esfera. El punto en el que una lluvia de meteoritos parece tener su origen se llama radiante. Cada lluvia recibe el nombre de la constelación más cercana. Durante la lluvia puede que los meteoritos parezcan desparramarse en todas direcciones. Pero se trata de una mera ilusión; de hecho, las trayectorias son aproximadamente paralelas y su divergencia aparente débese a que las observamos desde perspectivas diferentes.

Gracias a situarse alejados unos de otros, las trayectorias observadas pueden extrapolarse hacia atrás hasta que lleguen a cortarse, aproximadamente en el radiante. Gerver extrapola las trayectorias sosteniendo una regla sobre el firmamento, alineándola primero con la trayectoria registrada por el primer observador y luego con la observada por el segundo. Cada trayectoria se extrapola a continuación hasta el punto donde se cortan. (En un plano celeste esas extrapolaciones quedan descritas por líneas curvas a causa de las distorsiones que impone la proyección de la superficie curva de la esfera celeste sobre una superficie plana.) Una vez localizado el radiante es posible calcular la altura del meteorito en el momento en que comenzó a verse y la longitud de su trayectoria.

La velocidad del meteorito con relación a la Tierra es el cociente entre la longitud calculada de su trayectoria y el tiempo que tarda en volatilizarse. La velocidad que obtenemos es aproximada, ya que este tiempo es tan sólo una estimación. La precisión del experimento puede aumentar notablemente si cronometramos el tiempo de volatilización con algún instrumento. Mejor aún, se podría registrar en vídeo la lluvia de meteoritos y luego emplear la grabación para cronometrar ese tiempo. Pero con tales refinamientos el experimento perdería su encanto. La intención de Gerver es calcular la distancia al Sol sin instrumentos.

Para dar el siguiente paso se precisa conocer los rudimentos de las órbitas de los meteoritos. Muchos de éstos, entre los que se cuentan los asociados a las lluvias persistentes, se mueven siguiendo una órbita elíptica en torno al Sol hasta que la gravedad terrestre los captura. Cuando uno de ellos cruza la órbita terrestre, su velocidad con respecto al Sol no puede ser superior a $\sqrt{2}$ veces la velocidad de la Tierra. Los que se mueven con una velocidad mayor sólo describen una órbita en torno al Sol, para perderse luego en un viaje que les lleva hasta una distancia efectiva infinita del sistema solar.

Como Gerver limita sus observaciones a lluvias persistentes, supone que todo meteorito que figure en sus cálculos se mueve a una velocidad (con respecto al Sol) que no rebasa el límite superior. Una vez admitido este límite y medida la velocidad del meteorito con respecto a la Tierra, tenemos los datos necesarios para calcular la velocidad de la Tierra.

La velocidad de un objeto es un vector, o sea, un segmento rectilíneo cuya orientación representa la dirección y el sentido en que se mueve el objeto y cuya longitud representa la magnitud

de la velocidad. Las velocidades del meteorito con respecto a la Tierra y al Sol y la velocidad de la Tierra con respecto al Sol las podemos representar a través de un diagrama de velocidades. Para ello empezaremos por dibujar un vector de longitud arbitraria, que representa la velocidad de nuestro planeta. La velocidad del meteorito con respecto al Sol será $\sqrt{2}$ veces mayor; ello bajo la hipótesis de que la velocidad del meteorito se acerque al límite superior.

El tercer vector, que se extiende desde el extremo del vector que representa la velocidad de la Tierra hasta el extremo del que representa la velocidad del meteorito con respecto al Sol, no es más que la velocidad del meteorito con respecto a la Tierra. Su longitud es la velocidad que se calculó observando el trazo luminoso del meteorito. Adviértase que estos vectores forman un triángulo del que se conoce un lado y los otros representan la velocidad, por ahora desconocida, de la Tierra. Para hallar ésta a partir del triángulo, hay que determinar primero trigonométricamente el ángulo entre la velocidad de la Tierra y la velocidad observada del meteorito.

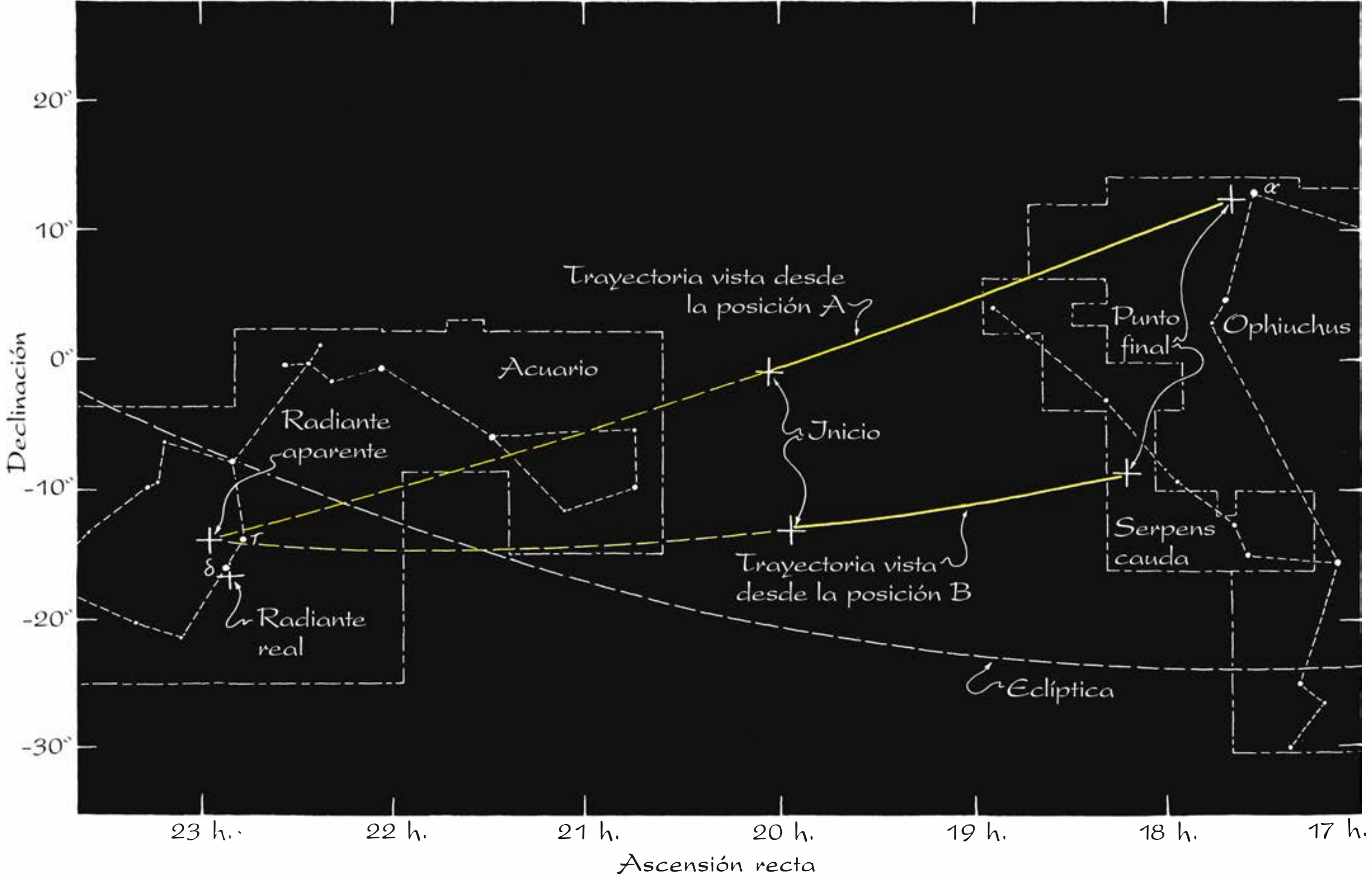
La velocidad observada del meteorito con relación a la Tierra apunta hacia nosotros desde el radiante. Señalemos éste en un mapa celeste. La determinación de la velocidad de la Tierra mediante el mapa celeste es un poco más enredado. Uno de los ejes del mapa indica la ascensión recta; el otro, las declinaciones, que se miden en grados. Durante la noche, las estrellas de la esfera celeste se mueven siguiendo trayectorias paralelas a una línea de declinación. La ascensión recta suele medirse en unidades horarias, porque la esfera celeste gira un cierto ángulo cada hora. Como en dar una rotación completa de 360 grados se tarda 24 horas, cada hora de rotación equivale a 15 grados.

En el mapa, los cuerpos celestes pueden ubicarse especificando la declinación y la ascensión recta. Imaginemos que el plano del ecuador se prolongue hasta la superficie interna de la esfera. Imaginemos, asimismo, una cuadrícula esférica, similar a las líneas de latitud y longitud de los mapas geográficos, tendida sobre esa superficie. Tal cuadrícula representa la declinación (a la manera de la latitud) y la ascensión recta (la longitud).

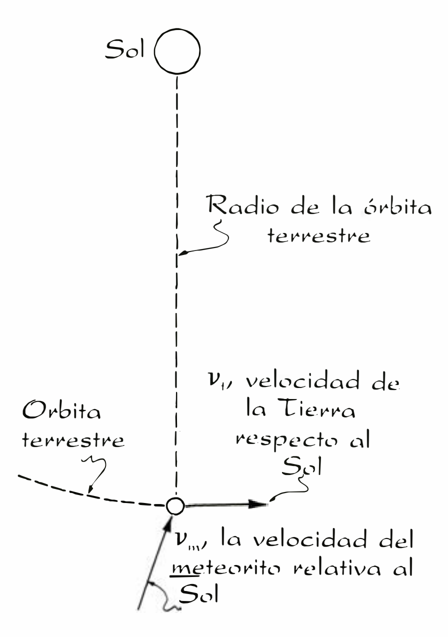
A lo largo de un año, el Sol aparenta moverse con respecto a la esfera celeste siguiendo una trayectoria curva llamada eclíptica; este movimiento se mide en grados. (Este desplazamiento es, desde luego, sólo aparente, pues es la Tierra quien en realidad orbita en torno al Sol dentro del llamado plano de la eclíptica.) Hay que averiguar en qué punto de la eclíptica se encontraba el Sol el día que se observaron los meteoritos. Luego nos trasladamos 90 grados hacia el este siguiendo la eclíptica. El vector que representa la velocidad de la Tierra partirá de la posición correspondiente en el firmamento.

Ya tenemos dos vectores velocidad determinados sobre el mapa celeste, uno para la velocidad del meteorito con respecto a la Tierra y otro para la velocidad de la Tierra con relación al Sol. Ahora se mide la distancia en grados entre las dos marcas de acuerdo con la escala de cualquiera de los ejes. Podemos marcar la distancia en el borde de una hoja de papel que luego alinearemos con el eje de declinaciones para pasarla a grados. El resultado será sólo una estimación del ángulo entre los dos vectores, dada la deformación que se introduce por usar un mapa plano.

El suplementario del ángulo así medido es el que subtienden en el diagrama vectorial los lados que representan la velocidad de la Tierra y la velocidad del meteorito que hemos calculado. Ese ángulo, junto con las longi-



1. Trayectorias de meteorito representadas en un mapa celeste



2. Un meteorito y la órbita terrestre

tudes de los lados conocidos, los sustituimos en la fórmula trigonométrica del coseno, que relaciona los dos lados con el coseno del ángulo que forman, lo cual nos permite obtener la incógnita que quedaba: la velocidad de la Tierra. Este cálculo nos proporciona un límite inferior de tal velocidad, puesto que se incluye la hipótesis según la cual la velocidad del meteorito alcanza su valor límite superior. Realmente, el meteorito podría ir más lento, en cuyo caso la velocidad de la Tierra sería mayor que la calculada.

Como la órbita terrestre es casi circular, su perímetro viene a medir aproximadamente $2\pi r$, donde r es la distancia entre el Sol y la Tierra. El pro-

v_m, la velocidad del meteorito relativa al Sol, se supone $\sqrt{2}\,v_t$

v_{mt}, velocidad del meteorito respecto a la Tierra

v_t, velocidad de la Tierra respecto al Sol

θ

Ángulo entre v_t y v_{mt}

$$(\sqrt{2}\,v_t)^2 = v_t^2 + v_{mt}^2 - 2\,v_t\,v_{mt}\cos\theta$$

3. Diagrama vectorial de velocidades

ducto de la velocidad de la Tierra por un año (expresado en las unidades adecuadas) será igual a la longitud de la circunferencia. De esta relación puede calcularse un límite inferior para la distancia al Sol.

En tres ocasiones, a lo largo de tres años, Gerver recogió datos durante lluvias de meteoritos. Le ayudaron su hermano Michael y Stephen Alessandrini, Marcus Wright, Jonathan Singer, L. Thomas Ramsey, Herb Doughty, Peter Gaposhkin, Ned Phipps, Agnis Kaugars y Cynthia Burnham. Necesitaba tal multitud de observadores dada la reducida probabilidad de que avistadores muy separados divisaran un mismo meteorito. El grupo se encontró con dificultades tales como el cielo encapotado o atascos de tráfico. La primera vez que se intentó, con uno de sus ayudantes situado a 16 kilómetros, localizaron un meteorito a la vez y en la misma zona del cielo. Pero cuando hizo los cálculos, la distancia al meteorito resultó negativa. Evidentemente, habían visto meteoritos distintos.

Gerver y su equipo acertaron con su primera observación válida a las 10,56 p.m., hora oficial de la costa Este, el pasado 11 de agosto. Esa noche, Gerver, Ramsey y Singer se hallaban apostados en la Carretera 17, a medio camino entre Los Gatos y Santa Cruz, California, y Michael Gerver se encontraba en Palo Alto, a 31 kilómetros de distancia. A la primera posición la llamaremos A y a la segunda B. Todos los observadores localizaron un meteorito de la luminosidad de Júpiter y con un trazo brillante desmesuradamente largo. Si bien la mayoría de los meteoritos visibles aquella noche formaban parte de la lluvia de Perseo, Gerver opina que el relumbrante que vieron ellos formaba parte de la lluvia de Delta Acuario, cuya trayectoria es perpendicular a la del grupo de Perseo.

Los observadores anotaron la altitud y azimut del punto final del meteorito. La altitud es el ángulo subtendido entre el punto final y el punto del horizonte justo por debajo del mismo. El azimut es el ángulo horizontal medido en sentido horario (visto desde arriba) desde el norte hasta el punto del horizonte situado debajo del punto final. Desde A la altitud del punto final era de 58 grados y el azimut de 225 grados. Desde B, la altitud era de 43 grados y el azimut, de 200 grados.

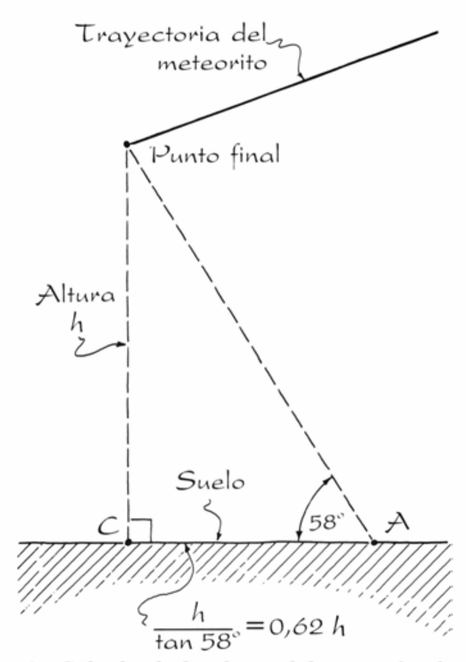
Sea C el punto del suelo directamente por debajo del punto final y sea h la altura de éste. Constrúyase un triángulo rectángulo con un cateto igual a h y el otro cateto igual a la distancia entre A y C. La altitud es el ángulo comprendido entre la hipotenusa y el cateto paralelo al suelo. Con la tangente de este ángulo puede determinarse este último cateto en función de h: su longitud es de 0,62 multiplicado por h.

Seguidamente, dibújese una vista en planta de A y C y constrúyase un triángulo rectángulo cuya hipotenusa sea la distancia horizontal de A a C, que vale 0,62 h; con un cateto que vaya de este a oeste y el otro de norte a sur. Como el azimut de C visto desde A es 225 grados, el ángulo comprendido entre la hipotenusa y el cateto norte-sur será de 45 grados, cuyo coseno es el cociente entre el cateto norte-sur y la hipotenusa. De esta relación podemos despejar la longitud del cateto norte-sur en función de h, que resulta ser 0,44 h. Análogamente, con la ayuda del seno de 45 grados, se obtiene la longitud del cateto este-oeste, que asimismo resulta ser 0,44 h. O sea, A está a 0,44 h al norte de C y a 0,44 h al este de C.

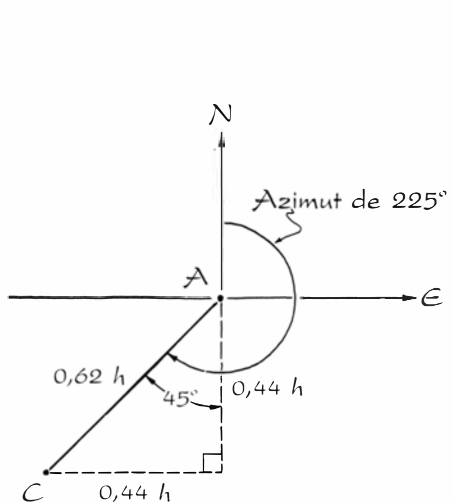
Estos cálculos se repiten con las observaciones hechas desde B. La separación sobre el terreno entre B y C es de 1,1 h. Por tener C un azimut de 200 grados, el ángulo que en el triángulo forman la hipotenusa y el cateto norte-sur es de 20 grados. Una vez resueltas las relaciones trigonométricas correspondientes, se encuentra que B está a 1,05 h al norte de C y a 0,38 h al este.

A continuación, se dibuja el triángulo que, sobre el terreno, forman A, B y C. Para ello, a la distancia norte-sur entre B y C se le resta la distancia norte-sur entre A y C, de lo que resulta que B está a 0,61 h al norte de A. Igualmente, a la distancia este-oeste entre A y C se le resta la distancia este-oeste entre B y C para encontrar que B está 0,06 h al oeste de A. Estas distancias, norte-sur y este-oeste, entre A y B constituyen los catetos de un triángulo rectángulo cuya hipotenusa es igual a la distancia real entre ambos puntos. El teorema de Pitágoras permite calcular la hipotenusa, que resulta ser de 0,61 h. Este resultado debe ser igual a la separación real (31 kilómetros) y h debe valer 50 kilómetros. Ya tenemos la altura correspondiente al momento en que dejó de verse el meteorito.

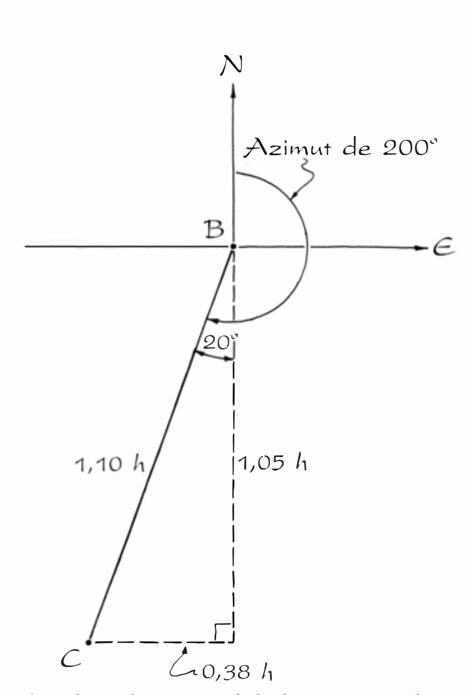
Para comprobar los cálculos, reconsideremos el triángulo trazado sobre el terreno cuya hipotenusa es la separación entre A y B. Con h igual a 50 kilómetros, el cateto norte-sur del triángulo debe medir 31 kilómetros y el este-oeste, tres kilómetros. Como la tangente del ángulo comprendido entre la hipotenusa y el cateto norte-sur es



4. Cálculo de la altura del punto final



5. Plano horizontal de la posición de A



6. Plano horizontal de la posición de B

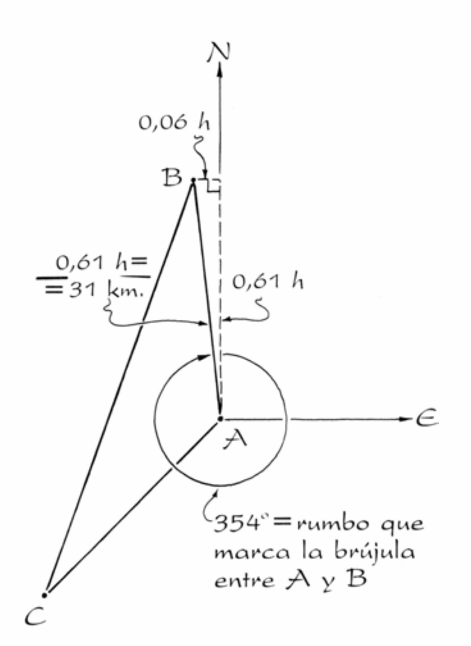
igual al cociente entre tres y 31 kilómetros, el ángulo correspondiente debe ser de seis grados. De aquí que la brújula debe marcar entre *A* y *B* un rumbo de 360 grados menos seis grados, o sea, 354 grados. Esa orientación era, en realidad, de 345 grados. Con una discrepancia de sólo nueve grados, los cálculos parecen de fiar.

Desde *A*, el comienzo del trazo luminoso del meteorito estaba localizado a una altitud de 52 grados y a un azimut de 160 grados. Si Gerver estuviese seguro de que los dos equipos de observadores hubieran divisado el meteorito simultáneamente, habría podido hallar ese punto del mismo modo que halló el punto final. Pero sin esa certeza, el punto inicial debe hallarse por medio del radiante. Algunas noches después de las observaciones, Gerver extrapoló hacia atrás, valiéndose de una regla, las trayectorias del meteorito observadas sobre el firmamento. Las trayectorias se cortaban exactamente al este de la estrella Tau Acuario, a una altitud de 20 grados y un azimut de 120 grados. Este radiante aproximado se encuentra a pocos grados de la estrella Delta Acuario, donde Gerver cree que está el verdadero radiante del meteorito.

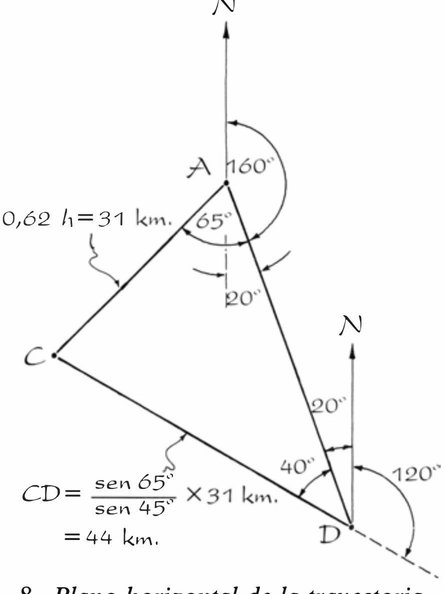
Para calcular la longitud de la trayectoria y la altura del punto inicial del mismo modo que Gerver, hay que dibujar una vista en planta de la proyección de la trayectoria sobre el suelo. Sea *D* el punto del suelo situado directamente debajo del punto inicial de la trayectoria. La orientación de ésta la establece el azimut del radiante, que es de 120 grados. Hallemos el ángulo *CAD*, perteneciente al triángulo *ACD*, restando al azimut de *C* el azimut de *D*. Hallemos el ángulo *ADC* basándonos en que el ángulo agudo que forman *AD* y la línea norte-sur es de 20 grados.

De los cálculos anteriores sabemos que la longitud de *AC* es de 0,62 *h*, lo que supone 31 kilómetros en este caso. Aplicando la fórmula trigonométrica de los senos, que relaciona los senos de los ángulos de un triángulo con la longitud de los lados opuestos a cada ángulo, hallamos la longitud de *CD* (44 kilómetros). Seguidamente se dibuja un triángulo rectángulo cuya hipotenusa sea la longitud de la trayectoria del meteorito, un cateto sea la distancia de *C* a *D* y el otro sea la longitud vertical de la trayectoria. El ángulo subtendido entre la trayectoria y la horizontal es la altitud del radiante (20 grados). La longitud de la trayectoria la calcularemos valiéndonos de la función coseno, y resulta ser de 47 kilómetros. Con la función tangente calculamos la longitud vertical de la trayectoria (16 kilómetros). Ya tenemos la longitud y la orientación de la trayectoria.

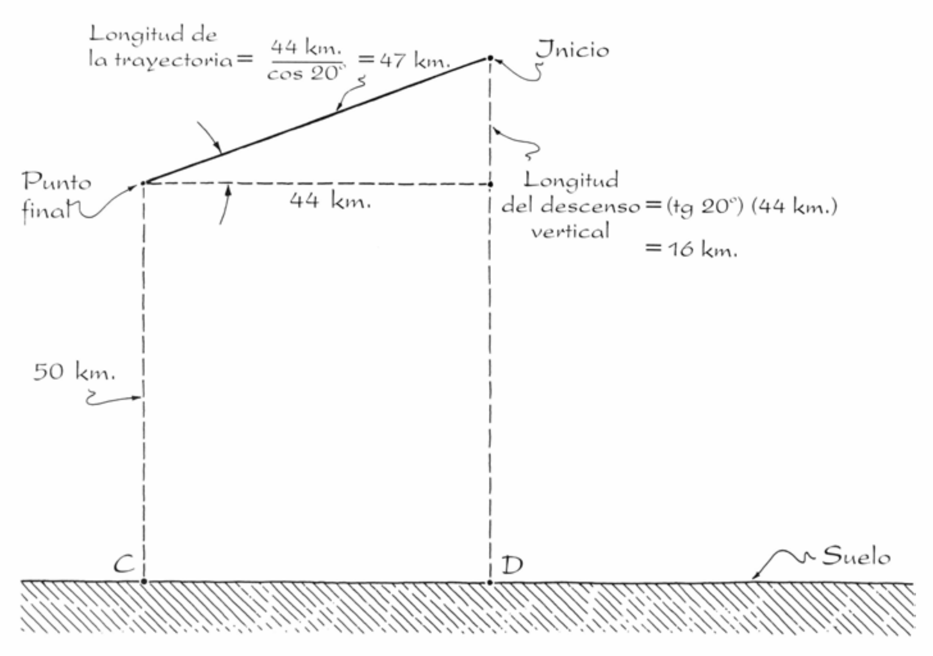
El meteorito pudo verse durante unos 2,5 segundos. Para que en ese tiempo recorriese 47 kilómetros, su velocidad respecto a la Tierra debía ser



7. Plano de A y B



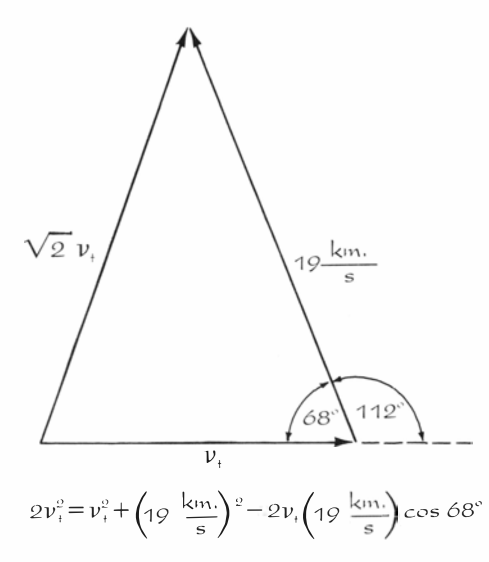
8. Plano horizontal de la trayectoria de un meteorito



9. Cálculos relativos a la trayectoria

de unos 19 kilómetros por segundo. En la noche de las observaciones la Tierra se dirigía hacia la constelación de Aries. Con un mapa celeste Gerver dedujo que el ángulo que formaban la velocidad de la Tierra con relación al Sol y la del meteorito con relación a la Tierra era de unos 112 grados. Con un triángulo construido con esos dos vectores y la velocidad calculada de 19 kilómetros por segundo, se puede deducir que la velocidad de la Tierra con respecto al Sol debe ser de al menos 13 kilómetros por segundo. Si dividimos por 2 π el producto de esta velocidad por el número de segundos que tiene un año, obtendremos como resultado un límite inferior de nuestra distancia al Sol (65 millones de kilómetros).

Gerver propone varias explicaciones posibles del resultado, que viene a ser



10. Vectores de la velocidad terrestre

aproximadamente la mitad de la verdadera distancia al Sol. Cabe que la velocidad del meteorito respecto al Sol no estuviera cerca del límite superior antes de penetrar en la atmósfera. Además, el efecto retardador de ésta no se tiene en cuenta en los cálculos. La fuente de error más grave reside en la apreciación del tiempo de volatilización, que Gerver cree puede estar equivocada hasta en un 20 por ciento.

Gerver observó, asimismo, meteoritos de Perseo, pero sin ayudantes. Estos meteoritos siguen la órbita del cometa Swift-Tuttle, cuyo período es de 120 años. Cuando atraviesan la órbita terrestre, su velocidad relativa al Sol debe ser próxima al límite superior de la de un cuerpo que orbite en torno al astro. Por extrapolación, estimó que su radiante podía estar a pocos grados al este de Epsilon Casiopea, que se encuentra a unos 10 grados del radiante más comúnmente aceptado, contiguo a Eta Perseo. Uno de los meteoritos parecía moverse desde Eta Hércules a Beta Hércules en 0,25 o 0,5 segundos, más o menos. En el momento en que la altitud de Eta Hércules era de 69 grados y el azimut de 274 grados, la altitud de Beta Hércules era de 58 grados y el azimut de 240 grados. El radiante estimado por Gerver estaba a una altitud de 25 grados con un azimut de 22.

Admitiendo que la altura inicial del meteorito fuese de 66 kilómetros, Gerver calculó que la altura final fue de 57 kilómetros y que la longitud de la trayectoria había sido de 23 kilómetros. Estimando en 0,35 segundos el tiempo de volatilización, dedujo que la velocidad del meteorito con respecto a la Tierra era de 65 kilómetros. El radiante que había estimado se encontraba a unos 50 grados de la dirección en que viaja la Tierra. Con un diagrama vectorial calculó un límite inferior para la velocidad de la Tierra relativa al Sol, que resultó de 36 kilómetros por segundo. Con este resultado el límite inferior para la distancia al Sol quedaría en 180 millones de kilómetros.

Gerver utilizó mapas celestes, pero señala que las mediciones de altitud pueden hacerse con un astrolabio rudimentario. Para ensayarlo estuvo observando estrellas con un bloc de hojas de papel que sostenía verticalmente, colocando frente a su ojo derecho una de las esquinas inferiores del bloc y manteniendo el canto inferior de éste exactamente horizontal. Luego movía el ojo hacia arriba hasta que veía una estrella que coincidiera con algún punto del canto vertical opuesto. En ese borde del papel marcaba la posición aparente de la estrella y con una regla medía la longitud del bloc y la distancia desde el canto inferior hasta la marca. Con el cociente entre ambas longitudes podía determinar el ángulo que formaba la horizontal con la dirección que apuntaba hacia la estrella. Descubrió que de este modo se podía averiguar el ángulo con una diferencia de menos de cinco grados con respecto a la verdadera altitud de la estrella.

Ofrece Gerver algunas indicaciones para mejorar la puesta en práctica de su experimento. Los observadores deben conocer bien las constelaciones, de modo que estén capacitados para localizar exactamente la trayectoria de un meteorito en el firmamento nocturno y señalarla en un mapa celeste. En cada puesto de observación debe haber al menos dos personas, una para registrar el tiempo de volatilización y otra para memorizar la trayectoria antes de marcarla en el mapa. Con más de dos puestos de observación mejora la precisión de los cálculos.

El eslabón más débil del método de Gerver es la estimación del tiempo de volatilización, especialmente si es menor que un segundo. A veces, tras la desaparición de un meteorito, hacía un intento consistente en barrer el cielo con un dedo de su brazo extendido a la velocidad aproximada del meteorito. Durante esa maniobra, recitaba el sonsonete para medir el tiempo. Así la duración del meteorito resultaba ser el producto de la duración del barrido con el dedo por el cociente entre el ángulo de paso del meteorito y el ángulo barrido por el dedo.

Libros

Ecología, matemática, ingeniería de proteínas y filosofía e historia de la ciencia en Italia

Luis Alonso, Miguel de Guzmán, Luis Cornudella y Mariano Artigas

The Background of Ecology. Concept and Theory, por Robert P. McIntosh. Cambridge University Press, 1985. Si el nombre hiciera la ciencia, la ecología remontaría sus orígenes a 1866, cuando así la bautizó Ernst Haeckel. Si la pauta la diera el primer trabajo sistemático, habría que esperar dos décadas más: en 1887 S. A. Forbes publicaba en un oscuro *Bulletin Science Association of Peoria* un artículo de diez páginas que valía por todo un programa, "The lake as a microcosm". Aunque sería más próximo a la verdad retrasar hasta el decenio siguiente la configuración de la nueva disciplina biológica, con la obra del danés Eugenius Warming, *Plantesamfund: Grundtraek af den okologiske Plantegeografi* (Copenhague, 1895); en particular, en su versión alemana, un año después.

Por ser la ecología una ciencia de síntesis, sus raíces últimas pueden hundirse en los antecedentes de las partes que la componen. Así, la ecología terrestre encuentra exactas intuiciones en las descripciones de Teofrasto y sus diferentes escuelas. San Alberto, en el siglo xiii, escribe atinados párrafos sobre la distribución de las plantas de acuerdo con el clima, y tres centurias más tarde Cesalpino tendrá especial cuidado en matizar si la planta de que está hablando es "montana", crece junto a los ríos o se da en conjunción con otras, de una manera más o menos regular. No son tan precoces, sin embargo, otras ramas de la ecología: la acuática, la etofisiológica y la matemática.

En su nacimiento, la ecología depende estrechamente de la llamada economía de la naturaleza. Idea arraigada en la observación común y ratificada en la explicación finalista del designio creador. "Por economía de la naturaleza, escribe Linneo, se entiende la sapientísima disposición de los seres, instituida por el Soberano Creador, de acuerdo con la cual éstos tienden a fines comunes y poseen funciones de reciprocidad." Los vegetales, viene a explicar, están limitados por los herbívoros y éstos por los carnívoros; las plantas aprovechan la diáspora de las semillas para su dispersión a través de las aves; los carroñeros y detritívoros desmenuzan los restos hasta la particulación. No conoce todavía el ciclo de los nutrientes en su detalle químico, pero la observación no es tosca. Y ello vale también para la asignación de funciones exclusivas a las distintas especies.

La ecología debe mucho también a la geobotánica, y al impulso que ésta recibió, en 1805, con el *Essai sur la géographie des plantes*, de Alexandre de Humboldt, donde se aboga por el estudio de la distribución de las plantas de acuerdo con la altitud, zona geográfica y factores físicos (temperatura y presión, sobre todo); se insiste en la necesidad de determinar su forma de agrupación; en el levantamiento de mapas de los grandes grupos, etcétera. (Andando el siglo, ello dará lugar a la introducción de sendos capítulos sobre la geografía botánica y geografía zoológica en los programas de enseñanza de la botánica y zoología, respectivamente.) En una línea convergente, la obra de los evolucionistas, de Darwin, sobre todo, dará mayor consistencia al razonamiento que explica esa diversidad.

Desde una óptica fisioetológica, vienen contribuyendo en la preparación de la teoría ecológica los descubrimientos de Justus von Liebig, y los escritos del propio Darwin sobre fecundación de las orquídeas por los insectos y las plantas carnívoras, entre otros. (Ante la importancia que adquirirá más tarde la termodinámica en el discurso ecológico, resulta curioso leer, en 1876, el siguiente párrafo de Francisco de Paula Rojas, catedrático entonces de la Escuela de Ingenieros de Barcelona: "Sabíase que bajo la *influencia de la luz* se verificaba la descomposición del ácido carbónico del aire y la fijación o asimilación del carbono por la planta. Pero ¿qué papel hacía la luz en este fenómeno? Se ignoraba... La luz presta esa fuerza viva: la planta no puede utilizar exclusivamente para su nutrición y desarrollo la fuerza viva del calor oscuro o de las ondas caloríficas no luminosas: necesita principalmente la fuerza viva tal como ésta se presenta en las rapidísimas vibraciones de la luz; y aun dentro de la misma luz, sabido es que las ondas más cortas, o sea la luz de más rápida vibración (luz violeta), es más utilizable, más eficaz, para efectos de descomposición, que la luz roja, por ejemplo" (*Termodinámica. Su historia, sus aplicaciones y su importancia*; Barcelona, 1876).

A lo largo de las tres últimas décadas del siglo xix van introduciéndose paulatinamente los conceptos medulares de la ecología: el de biocenosis y de adaptación los más significativos. Paulatinamente irían generalizándose otros: pirámides de números, cadena trófica, sucesión vegetal, clímax, oligotrofia, eutrofia, nicho, etcétera. Se crean, al propio tiempo, instituciones y laboratorios, sobre todo en los Estados Unidos y Alemania.

Si la demografía había dejado sentir su peso en la teoría de la evolución, otro acontecimiento matemático, de elegante sencillez, puso a la ecología en el firme sendero de la ciencia: la formalización de la interacción entre depredador y presa. Los estudios se habían ido acotando con el trabajo del entomólogo canadiense William Robin Thompson, quien había descrito algebraicamente las relaciones entre parásito y huésped; A. J. Lotka las formalizó en ecuaciones diferenciales. Pero el refinamiento sería obra de Vito Volterra, aplicado ya al caso general depredador-presa. A Volterra le llegó el interés por la ecología en una conversación incidental con quien luego se convertiría en su yerno, Umberto D'Ancona. Era este último un biólogo marino que estaba estudiando a la sazón los cambios de población observados en los bancos del Adriático: los depredadores habían elevado su número tras la suspensión de las faenas de pesca a raíz de la primera guerra mundial. Volterra, físico matemático, se tomó el asunto como si de un problema de su especialidad se tratara.

Y llegó a las siguientes ecuaciones: para un sistema de dos especies –una, presa (N_1); depredadora, la otra (N_2)– ocurría que la presa se ajustaba a la ecuación $dN_1 / dt = r_1 N_1 - k_1 N_1 N_2$, donde r_1 es el coeficiente de crecimiento de la presa y k_1 es una constante. Establece esa ecuación que la tasa de crecimiento de la presa (primer miembro de la igualdad) equivale a la diferencia entre la tasa de crecimien-

to natural de la presa (un crecimiento exponencial, $r_1 N_1$) y el abatimiento de la presa por parte del depredador ($k_1 N_1 N_2$). Igual ocurre con la situación que caracteriza al depredador (N_2): $dN_2 / dt = k_2 N_1 N_2 - d_2 N_2$, donde d_2 es el coeficiente de mortalidad del depredador y k_2 es una constante. La ecuación establece que la tasa de crecimiento del depredador (primer miembro de la igualdad, dN_2 / dt) es igual al crecimiento resultante de la ingestión de la presa (que se supone es proporcional al producto de los números de ambas especies) menos la mortalidad natural que se registra en el depredador ($d_2 N_2$). Comparando la evolución en el tiempo de la presa con la desarrollada por el depredador, tenemos: $dN_1 / dN_2 = N_1 (r_1 - k_1 N_2) / N_2 (k_2 N_1 - d_2)$. El modelo de Volterra tuvo una repercusión inmediata tras la aparición de un breve resumen del mismo en *Nature* en 1926.

Los trabajos de biología marina y limnología constituirían los otros cauces de información y elaboración teórica. Las características físicas del medio obligan a centrar la atención en ellas tanto o más que en la fauna y flora componentes. Y es ahí donde se aprecia con mayor nitidez el aspecto dinámico del flujo de energía o ciclo trófico, que enhebra productores (elaboración del capítulo de la producción primaria con los estudios algológicos sobre todo), consumidores (peces) y descomponedores (la importancia de la biomasa bacteriana). En este sentido, es de justicia citar el artículo pionero de Raymond L. Lindeman, muerto a los 26 años, sin verlo publicado: "The trophic-dynamic aspect of ecology" (*Ecology*, 23, 1942).

La ecología es la ciencia de los ecosistemas. El vocablo, acuñado por el biólogo inglés A. G. Tansley en 1935, quería poner orden en una discusión semántica sobre el significado de la unidad fundamental del estudio de las comunidades y la sucesión de las mismas. Sobre el concepto de ecosistema y las propiedades del mismo, estabilidad, persistencia, diversidad, sucesión, etcétera, se han ido modelando distintas aproximaciones o esquemas teóricos, que recurren a la teoría de juegos, a la termodinámica de los procesos irreversibles, a la teoría de la información y a muchos campos más. Es, pues, una ciencia viva e inquieta, quizá desfigurada por el ismo de la moda: el ecologismo.

McIntosh nos cuenta, de intento, la historia reciente de la ecología norteamericana e inglesa, tal vez exigiendo del lector una familiaridad con el tema que en otros libros de este tenor no se precisaría. Por lo que se ha comentado acerca de este libro en otras revistas, la opinión más extendida hubiera deseado una exposición más escolar, con menos referencias cruzadas que dificultan la lectura. Se da la paradoja de que resulta muy instructivo leyéndolo al revés: desde el índice temático. (Con algunas salvedades: no aborda la teoría de juegos, la mecánica estadística aplicada a la ecología, ni la persistencia de los ecosistemas, dedica escasas líneas a la diversidad, y algún pero más.)

En España, la ciencia de la ecología ha conocido un desarrollo extraordinario merced a una conjunción de factores entre los que merecen destacarse la tradición fitosociológica, por un lado, y de investigación pesquera, por otro. Y sobre todo, la obra creadora de Ramón Margalef, que abarca desde trabajos minuciosos de campo (en algología sobre todo) hasta tratados generales al viejo uso, pasando por aportaciones nucleares a la disciplina: la teoría de la información, principios unificadores de la ciencia ecológica y perspectivas de la misma. McIntosh las recoge para poder explicar el desarrollo general de la ecología. (L. A.)

Mathematical People. Profiles and Interviews, por Donald J. Albers y G. L. Alexanderson (eds.). Birkhäuser; Basel, 1985. La actividad matemática ha tenido desde antiguo aspectos esotéricos que mantienen a la comunidad de los matemáticos disociados del resto del mundo cultural, separados incluso en gran medida de una buena porción del mundo científico más cercano que les rodea. Los logros importantes de otras ciencias son más fácilmente transmisibles a cualquier persona culta, ya sea aproximándole a una versión simplificada de su contenido o bien mediante una explicación adecuada de sus posibles repercusiones, más o menos cercanas. Ambos caminos suelen estar vedados muy frecuentemente cuando se trata de hacer entender el progreso de la matemática actual.

Esta situación entraña serios perjuicios a la cultura en general y a la comunidad matemática en particular. El ahondamiento del hiato existente entre las dos culturas, literaria y científica, se hace mucho más evidente cuando uno pone la mirada en el mundo matemático, con el consiguiente empobrecimiento que esto lleva consigo para todos. Desde el punto de vista de la educación, concebida ésta como ayuda a la formación equilibrada y armoniosa de una persona, la consideración de la matemática que hoy prevalece, como una ciencia lejana y esotérica, sólo para iniciados, contribuye fuertemente al encarrilamiento prematuro, un tanto absurdo, de nuestros jóvenes. Por un lado aquellos que, se piensa, están llamados para tal actividad, por otro los que, según parece, carecen en mayor o menor grado de este extraño don.

A mi parecer, esta situación de nuestra educación, así como la presencia masiva del fracaso escolar, especialmente notorio en el campo de las matemáticas, revela la inefectividad de nuestro estilo de enseñanza de las matemáticas para extraer de su riquísima vitalidad de casi tres milenios ni siquiera una mínima parte del jugo humano que contiene en una forma asimilable por una buena mayoría de nuestros estudiantes. Las técnicas y rutinas iniciales de cualquier disciplina, descarnadas y desprovistas de motivación, constituyen un aterrador esqueleto, capaz de amedrentar a cualquiera. Las mismas ideas, técnicas y rutinas, arropadas con el calor humano de las personalidades que las iniciaron o sostenidas por las ricas consecuencias y aplicaciones a que dan lugar, pueden mucho más fácilmente atraer y estimular la actividad alrededor de ellas.

La matemática posee una riqueza humana difícilmente sospechada, incluso por los matemáticos profesionales que no han hecho un esfuerzo por introducirse en la historia de su evolución, sus relaciones con la filosofía y evolución general del pensamiento, por conocer de cerca la personalidad de algunos de los matemáticos famosos o por desentrañar algunas de las muchas aplicaciones con las que está influenciando nuestra existencia cotidiana. De estos cuatro aspectos, historia, filosofía, *biografías*, aplicaciones, que pudieran ayudar a salvar el abismo, por lo que a las matemáticas se refiere, entre las dos culturas, quiero restringirme aquí al tercero, que es precisamente el contenido de la obra que comentaremos más en detalle.

Los matemáticos constituyen una comunidad extremadamente interesante. Ha sido así históricamente y así sigue siendo en la actualidad. Entre los más famosos matemáticos ha habido de todo y es de suponer que también siga habiendo hoy día: místicos como Ramón Llull; filósofos como Pitágoras, Descartes, Leibniz, Pascal; políticos como el citado Leibniz y Pearson; escritores de todos los géneros, como Kepler; en ciencia ficción, Lewis Carrol, etcétera. Se puede afirmar con seguridad que el matemático es, entre los científicos, quien más cerca se encuen-

tra del artista. Para el matemático el mundo, desde los pitagóricos, es todo él "armonía y número", y la actividad matemática está, en un grado intenso, regida por la búsqueda de la belleza, más aún que por la persecución de la mera verdad. Esto que afirmaba explícitamente Hermann Weyl, uno de los más profundos matemáticos de nuestro siglo, es compartido implícitamente por una buena parte de los matemáticos de siempre.

Del contacto con un matemático famoso de cualquier época a través de su biografía son muchas las lecciones de interés para todos que pueden desprenderse. ¿Cuál fue su ambiente de partida? ¿Cuáles fueron los influjos iniciales que le decidieron a marchar por el camino de la matemática? ¿Qué obstáculos encontró? ¿Cómo fue el adentrarse en los campos en los que llegó a realizar sus mejores contribuciones? ¿En qué situación estaba el campo en que se especializó? ¿Cómo influyeron sus propias aportaciones? ¿Cómo transcurrió su vida? ¿Cómo influyó en su obra el medio en que se movió?

Este tipo de información sería ya apasionante para cualquier persona culta, interesada en los aspectos generales de la evolución de la sociedad y del pensamiento. Con ello tendría oportunidad de observar cómo es el mundo del matemático, cómo se va plasmando su personalidad, la inmensa variedad y al mismo tiempo los rasgos comunes de los matemáticos de todos los tiempos.

Para el profesional de la matemática sería interesante, si fuera posible, asistir al momento mismo en que surgió en la mente del matemático la luz que le llevó a sus éxitos más llamativos en su propio campo. Para el enseñante de la matemática tal información sería de un valor extraordinario al objeto de procurar detectar y estimular posibles tendencias incipientes en sus alumnos y ayudarles a realizar de lleno sus propias potencialidades matemáticas.

Biografías matemáticas realizadas bajo este punto de vista no abundan, ni mucho menos. Se podría decir que un ensayo aislado en esta dirección viene representado por la obra de E. T. Bell, *Men of Mathematics* (Victor Gollancz, London, 1937). La obra de Bell contiene una treintena de ensayos biográficos breves (unas veinte páginas cada uno) de los matemáticos más importantes del pasado. Tales ensayos están fuertemente teñidos por las peculiares formas del propio Bell de ver el devenir de las matemáticas y su relación con los diferentes aspectos de la sociedad y la cultura. Formas de ver que, muy probablemente, no compartirían en absoluto la mayoría de sus biografiados. Con todo sus biografías se leen con provecho y con el profundo interés que despierta una novela que se coloca muy cerca de la historia.

Los editores de *Mathematical People*, Donald J. Albers y Gerald L. Alexanderson, confiesan en el prólogo haber tomado su inspiración en la obra de Bell. Pero ellos han tenido la considerable ventaja de haber podido realizar su trabajo biográfico con la presencia y colaboración de sus mismos biografiados en la mayoría de los casos. *Mathematical People* contiene 25 biografías breves (unas 15 páginas bastante densas cada una) de matemáticos contemporáneos, famosos por una u otra razón. De estas 25 biografías, 19 toman la forma de entrevistas directas con el matemático en cuestión, realizadas por los editores o colaboradores, una es un ensayo autobiográfico y las 5 restantes son relatos biográficos realizados por colegas o alumnos de los biografiados.

Las biografías son concebidas en el sentido amplio señalado anteriormente, pero tratándose de personas tan cercanas en el tiempo, los autores han sabido con acierto sacar partido de esta circunstancia, logrando en ocasiones que queden suficientemente claras cuestiones de intenso interés para el observador de la comunidad matemática actual, tales como las siguientes: ¿Cómo ve el biografiado su propio campo de trabajo? ¿Cuáles son sus opiniones sobre aspectos controvertidos y candentes de la actualidad matemática (caminos de la enseñanza matemática, interacción entre matemática pura y matemática aplicada, influjo del ordenador sobre la matemática actual y la del futuro)? ¿Cuáles son los rasgos intelectuales adecuados para la matemática y en particular para la del propio campo del biografiado? ¿Cuál es la relación ideal de la comunidad matemática con la sociedad (participación en la investigación hacia la creación de nuevas armas y en otras afines...)?

La presentación de la obra es muy fluida, legible por todos y en ningún punto se hace técnica. Como los editores afirman en el prólogo: "...si bien hemos tratado de dar una idea del tipo de matemática que la persona en cuestión ha hecho, tratamos de concentrarnos en el aspecto humano. Hemos intentado descubrir por qué tal persona ha escogido la matemática, por qué se encuentra estimulada por la matemática y por qué piensa que lo que ha hecho es importante".

Entre los biografiados figuran personajes contemporáneos (algunos de ellos fallecidos muy recientemente) de gran influjo y renombre internacional. Destacaría los nombres de G. Polya, S. Lefschetz, S. M. Ulam, S. Chern y G. Birkhoff. Como dicen los mismos editores, "no afirmamos que los biografiados sean los matemáticos mejores, más productivos, ni siquiera los más interesantes del siglo XX. Pero ciertamente se encuentran entre los mejores, los más productivos y los más interesantes". No todas las personas elegidas lo han sido bajo el criterio de su producción propiamente matemática. Entre ellas se citan personajes bien conocidos en el mundo matemático y no matemático por otras razones diferentes. Así, por ejemplo, Martin Gardner y Raymond Smullyan, reputados por sus obras de divulgación de matemática recreativa y de lógica matemática.

La lectura del libro resulta fácil y agradable, si bien se echan de menos algunos milímetros en el tipo de letra. Contiene muchas fotografías de los entrevistados. La presentación es buena y cuidada. En resumen, un libro bien hecho que todos, matemáticos y no matemáticos, podemos leer con placer y provecho. (M. de G.)

INTRODUCTION TO PROTEINS AND PROTEIN ENGINEERING, por Barry Robson y Jean Garnier. Elsevier; Amsterdam, 1986. El advenimiento de las técnicas del ADN recombinante ha hecho realidad la práctica de la manipulación genética en su nivel más íntimo, el molecular. Las posibilidades que ofrecen las nuevas biotecnologías son potencialmente inmensas, apenas entrevistas en la actualidad. Las expectativas alumbradas, debido precisamente a este potencial, han trascendido de los círculos restringidos de la ciencia para convertirse en una cuestión de dominio, debate y discusión públicos. En razón de esta última circunstancia, el ADN, por tratarse del objeto primordial de la manipulación, ha adquirido una notoria popularidad, habiéndose convertido en una de las substancias químicas más conocidas por el público y considerada sin duda como la "molécula de la vida", a la que se le atribuyen propiedades y capacidades extraordinarias. Con todo, si consideramos la vida como el conjunto de facultades de autorreplicación, desarrollo y proliferación, en definitiva, de perpetuación, la panorámica reviste mucha mayor complejidad. El anterior aserto, con ser cierto en una primera aproximación, es consecuencia de una escueta formulación que transmite una imagen distorsionada y simplista de la realidad de la vida.

El ADN no es tanto la molécula de la vida como el "depositario" de la misma. La información genética se halla impresa o codificada en las secuencias de las bases nitrogenadas que son componentes de la molécula polimérica. Para la propagación de la vida es necesario, aunque no suficiente, disponer de la información. Esta última debe servir para algo, aplicarse a algún fin. En definitiva, la información genética debe ser transmitida o "expresada", siendo el objeto de la expresión de la información las proteínas. Estas substancias químicas son la materia prima de la vida. Toda la compleja e intrincada organización y maquinaria de las células, tanto animales como vegetales, se destina a una sola finalidad: la de producir proteínas.

El propósito del preámbulo precedente ha sido el de acotar los conceptos y resaltar la importancia singular de las proteínas. Esta última si cabe hoy acrecentada debido a la facultad de alterar su composición, diseñar moléculas *de novo*, e incluso introducirlas mediante inserción de los genes correspondientes, en la dotación genética de microorganismos, para proceder a su producción masiva. Es tangible la enorme repercusión en los sectores industrial y económico que conllevan estas posibilidades. Estas perspectivas subrayan la conveniencia de profundizar y ampliar el conocimiento de las proteínas y de sus cometidos y funcionamiento biológicos. El texto de Robson y Garnier, consciente de la mencionada situación, pretende ser una aportación a este campo de la química biológica hoy en acelerada expansión.

El libro aparece estructurado en capítulos, con el complemento de varios apéndices, que en realidad se distribuyen entre un preámbulo y dos partes, cada uno de ellos con un objetivo definido. Debe señalarse que la falta de su diferenciación explícita confiere cierta incoherencia al índice de materias. El preámbulo, que esencialmente se corresponde con el primer capítulo, tiene carácter introductorio. En él se describe la naturaleza química de las proteínas haciéndose merecido hincapié sobre su consideración como macromoléculas. Esta característica se destaca adecuadamente para introducir la noción de su modo de participación en los procesos biológicos. Es de agradecer la mención del progresivo avance del conocimiento sobre las proteínas como elemento decisivo de la adecuación de las concepciones a la realidad biológica. Al término de la introducción queda muy claro la naturaleza de las proteínas, para qué sirven y cómo su función depende esencialmente de su configuración espacial y de la flexibilidad de esta última.

Una vez establecida la singularidad de la conformación estructural, se procede a un estudio teórico pormenorizado de los distintos niveles de organización estructural en las moléculas proteicas. Este análisis, que constituye la primera parte del texto, engloba tres capítulos donde se abordan todos los aspectos teóricos de índole físico-química que subyacen en los conceptos de estructura primaria o secuencia de las proteínas; de estructura secundaria o del plegamiento de las moléculas en el plano en virtud de las interacciones intramoleculares; y de la función o estructura terciaria de las mismas. Esta parte se completa con dos capítulos adicionales dedicados al análisis de dos casos particulares: la lisozima y la familia de las metaloproteínas. La inserción de un estudio descriptivo de la lisozima se justifica por razones históricas. Recuérdese que fue en el año 1922 cuando Fleming observó la acción antimicrobiana de lo que sería ulteriormente la lisozima, al contaminar inadvertidamente un cultivo en una placa de Petri con un aerosol que contenía microgotas de secreción nasal, producido por un estornudo de un resfriado. En cualquier caso, la copiosa documentación aportada por la lisozima para la comprensión del mecanismo de plegamiento y desplegado de las moléculas enzimáticas constituye un elemento más de justificación. Estos dos capítulos agregados a la primera parte pueden considerarse superfluos, salvo para los interesados en la físico-química de dichos grupos de proteínas y, en particular, para quienes quieran ahondar en la química de la coordinación de los complejos de proteínas con metales.

La última sección de la obra, con ser la más extensa (siete capítulos), resulta la más lograda y novedosa. En esta parte se establece y desarrolla una correlación entre la manipulación genética "natural" (caps. 7 y 8) y "artificial" (caps. 9 a 13). El reciente y espectacular avance del conocimiento de los mecanismos de alteración y modificación de las moléculas biológicas (entrecruzamiento cromosómico, modo de acción de las enzimas de restricción, alteración de las moléculas precursoras por escisión-religamiento, mecanismos de elongación y de terminación, etcétera) se analiza de forma coordinada. Este estudio teórico integrado sirve de plataforma sustentadora para el desarrollo de los programas de cálculo de estructuras secundarias y terciarias de proteínas y éstos, a su vez, para el diseño de los métodos de predicción de estructuras y de refinamiento de modelos.

Dedican el penúltimo capítulo al aprovechamiento industrial de la química de las proteínas, con un extenso comentario de los métodos habituales de potenciación de los efectos beneficiosos de substancias biológicas o de diseño de nuevos productos. Una vez descrito el arsenal metodológico, se aborda su adecuación y perfeccionamiento bajo la óptica de los nuevos hallazgos tecnológicos. El texto culmina en el postrer capítulo: una glosa crítica de las características de las moléculas proteicas especialmente aplicadas a combatir el amplio espectro de la infección biológica y de los elementos principales a tener en cuenta en el diseño de vacunas de tipo peptídico y de la preparación de moléculas con capacidad inmunológica.

Como resumen crítico del libro merece destacarse el énfasis puesto en los aspectos teóricos de la química estructural de las proteínas, resaltando las páginas sobre el cálculo y refinamiento de estructuras. A pesar de que los autores han descuidado premeditadamente la bibliografía, substituyéndola por listados de lecturas complementarias al final de cada capítulo, la inclusión de un mínimo de referencias bibliográficas hubiese favorecido al conjunto de la obra. (L. C.)

LA FILOSOFIA DELLA SCIENZA IN ITALIA NEL '900, por Evandro Agazzi (introductor y coordinador). Franco Angeli; Milán, 1986. HISTORIA DEL PENSAMIENTO FILOSÓFICO Y CIENTÍFICO, por Ludovico Geymonat (coordinador). Editorial Ariel; Barcelona, 1985. Agazzi y Geymonat, directores de estas dos obras colectivas, son los principales cabezas de escuela de la epistemología italiana actual. *La filosofia della scienza* dirigida por Agazzi contiene 19 estudios monográficos sobre el desarrollo de la epistemología en Italia durante este siglo y su estado actual. En marzo de 1985 se celebró en Bérgamo un congreso sobre esos temas, organizado por la Sociedad Filosófica Italiana de Lógica y Filosofía de las Ciencias. Con un año de anticipación se encargaron los estudios a especialistas, y el material ha sido revisado y completado para su publicación. El resultado es enteramente satisfactorio. Cumple la finalidad historiográfica y además se abordan de modo original importantes cuestiones relativas a la fundamentación de las ciencias naturales y humanas. Los autores pertenecen a todas las tendencias filosóficas activas en Italia,

y las contribuciones conciernen tanto a las escuelas de pensamiento (positivismo, idealismo, marxismo, popperianismo, etc.), como a las ramas de la filosofía de las ciencias (matemáticas, física, ciencias sociales, inteligencia artificial, teoría de sistemas, etc.).

Paolo Aldo Rossi ha realizado una buena síntesis del pensamiento de Agazzi, mostrando sus orígenes y evolución, sus temas capitales y su impacto en Italia y en otros países (p. 403-444). Las primeras obras de Agazzi tratan sobre lógica y epistemología de la física. Están traducidas al castellano *La lógica simbólica* (Herder, 1967) y *Temas y problemas de filosofía de la física* (Herder, 1978). Posteriormente ha abordado cuestiones de antropología, ciencias humanas y ética.

El hilo conductor de sus trabajos es el análisis de la objetividad científica. Cada ciencia construye sus teorías delimitando un punto de vista específico, mediante predicados básicos que remiten a un contexto lingüístico y a criterios operativos. Así se consigue la intersubjetividad, que es la objetividad en sentido débil. La verificación de una teoría está sujeta a las condiciones del punto de vista adoptado. No es definitiva, pero tampoco es arbitraria, ya que se realiza apelando a una base teórica y empírica bien delimitada. La verdad científica es contextual, parcial y perfectible. Pero es auténtica: aquí se fundamenta la objetividad en sentido fuerte.

La epistemología de Agazzi permite explicar el valor del conocimiento científico, superando el instrumentalismo que lo reduce a simple herramienta para efectuar predicciones. Cada objetivación representa un conocimiento de la realidad, pero no la agota. Esta perspectiva da un tratamiento equilibrado a cuestiones como el estatuto epistemológico de las ciencias humanas y de la filosofía, la relación entre metodología y teoría del conocimiento, y asimismo aprovecha los aciertos parciales del operacionalismo y del empirismo sin caer en los reduccionismos que suelen acompañarlos.

Giulio Giorello expone la perspectiva marxista (p. 259-301), que se centra en la evolución del pensamiento de Ludovico Geymonat, maestro de esta corriente. Giorello fue uno de los redactores de la *Historia del pensamiento científico y filosófico*, dirigida por Geymonat, que paso a comentar. La apología del marxismo es el objetivo de esta obra, tal como se afirma explícitamente en el texto (II, p. 10). La orientación general está desarrollada en el capítulo 5 del tomo III, y es fácil de sintetizar. Los autores afirman: "no existe en la actualidad –a nuestro parecer– una alternativa seria al materialismo dialéctico" (III, p. 353).

Tres son las razones que –según los autores– avalan esa afirmación. La primera es que el materialismo dialéctico, MD, renuncia a toda pretensión de carácter absoluto: construye una concepción global de la realidad, pero permanece abierto a los cambios que se dan en las ciencias, cuyos conocimientos son siempre relativos. En segundo lugar, frente al subjetivismo, el MD afirma que los conocimientos científicos son aproximaciones sucesivas a la realidad: éste sería el significado del verdadero materialismo, que nada tiene que ver con el mecanicismo ingenuo del pasado. Hay un tercer motivo: el MD da una interpretación materialista del hombre que, de acuerdo con la ciencia moderna, no debería ser concebido como un ser excepcional dentro de la naturaleza.

Sin embargo, la provisionalidad y el realismo de la ciencia nada tienen que ver con el materialismo ni con la dialéctica. Y el reduccionismo es un enfoque metodológico que ha de aplicarse con cuidado al estudio del hombre, si no se desea incurrir en extrapolaciones injustificadas. Por otra parte, el MD se presenta como la verdadera interpretación global de la realidad. Por tanto, ¿qué sentido tiene decir que renuncia a toda pretensión de carácter absoluto?

Los autores afirman, con razón, que la validez del MD es un problema filosófico, y lo plantean expresamente. Resulta lamentable que a continuación nos digan que "por supuesto, no es éste el lugar apropiado para un debate en profundidad de estas cuestiones" (III, p. 352). No será por falta de espacio, pues los tres tomos de la obra suman 1756 páginas.

Vayamos a las consecuencias prácticas. Los autores denuncian la insuficiencia de la cultura actual y afirman que debemos construir una nueva (III, p. 353-358). Un aspecto importante es que "hay que establecer cuáles son las tareas que deben llevar a cabo las masas una vez que –a través de las luchas políticas– hayan comenzado a tomar parte activamente en el desarrollo de la cultura". En ese ámbito, la primera tarea de las masas "consiste en recordar a todos los estudiosos su deber de permitir que la ciencia asuma un auténtico significado cultural. Lenin ha recordado reiteradamente este deber, hasta los últimos años de su vida".

Como no parece haber criterios objetivos, habrá que confiar en la buena fe de las masas (o, sobre todo, de sus dirigentes). En todo caso, los científicos deberán comprobar si sus carnets van de acuerdo con las ideas de los políticos. Los autores dedican un apartado a "la no-neutralidad de la ciencia" (III, p. 342-347). Allí explican el significado de "la contraposición leninista entre ciencia proletaria y ciencia burguesa" (p. 346), y afirman que "la ciencia proletaria se compromete francamente en los más encarnizados debates filosóficos" (p. 347).

El rigor de la física es una piedra de toque que permite comprobar la validez de las especulaciones. Veamos algunos ejemplos de física proletaria. La *Historia* de Geymonat incluye un capítulo sobre el origen del universo, escrito por Ugo Giacomini (II, p. 462-492). Para defender el materialismo, se basa en la nueva cosmología, que es el modelo del estado estacionario propuesto en 1948 por Hermann Bondi y Thomas Gold (II, p. 475-479). Cuando se refiere a la radiación de fondo de microondas, afirma que "no ha faltado quien sostuviera" que se trata de un residuo de los acontecimientos del universo primitivo (II, p. 480). Esto bastaría para sonrojar al especialista más modesto. No es difícil encontrar el motivo de tales valoraciones. Giacomini subraya que la característica fundamental del modelo del estado estacionario es la "creación continuada de materia", lo cual le lleva a afirmar: "nada más diferente de esta teoría que el principio de creación tal como se lo entendía en el ámbito del discurso religioso" (II, p. 479). Esto le permite concluir que "el principal significado filosófico de la cosmología es, pues, la sustitución que ella lleva a cabo del viejo *Weltbild* religioso y metafísico" (II, p. 491). La manipulación ideológica no acaba aquí. Según Giacomini, "el principio de la creación continua no es en realidad otra cosa que el último de los grandes principios de conservación" (II, p. 479). Que tomen nota los autores de textos de física.

La obra de Geymonat contiene otro capítulo en el que se analizan las implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica. Su anónimo autor tampoco parece estar muy al día. Afirma que la teoría de las partículas elementales y las discusiones metodológicas se encuentran en un período de estancamiento (II, p. 447). Son, obviamente, los datos del autor los que están estancados: no menciona las desigualdades de Bell, ni los quarks, ni la teoría electrodébil (por referirme sólo a cuestiones anteriores a la primera edición italiana de la obra). (M. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DISLEXIA

THE PSYCHOLOGY OF READING. Eleanor J. Gibson y Harry Levin. The MIT Press, 1975.

DYSLEXIA: THEORY AND RESEARCH. Frank R. Vellutino. The MIT Press, 1979.

SPEECH, THE ALPHABET AND TEACHING TO READ. I. Y. Liberman y D. Shankweiler en *Theory and Practice of Early Reading: Vol. 2*, dirigido por Lauren B. Resnick y Phyllis A. Weaver. Lawrence Erlbaum Associates, 1980.

BIOBEHAVIORAL MEASURES OF DYSLEXIA. Dirigido por David B. Gray y James F. Kavanagh. York Press, 1985.

ESTRUCTURA DE LOS POLIOVIRUS

PORTRAITS OF VIRUSES: THE PICORNAVIRUSES. Joseph L. Melnick en *Intervirology*, vol. 20, n.ºs 2-3, págs. 61-100; 1983.

PRINCIPLES OF VIRUS STRUCTURE. Stephen C. Harrison en *Virology*, dirigido por Bernard N. Fields. Raven Press, 1985.

THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF POLIOVIRUS AT 2.9 Å RESOLUTION. J. M. Hogle, M. Chow y D. J. Filman en *Science*, vol. 229, n.° 4720, págs. 1358-1365; 27 de septiembre de 1985.

ENFRIAMIENTO Y CONFINAMIENTO DE ATOMOS

ATOMIC BEAMS STOPPED BY LASER LIGHT, AND TRAPPED. Bertram M. Schwartzchild en *Physics Today*, vol. 38, n.° 6, págs. 17-21; junio, 1985.

LASER COOLING AND ELECTROMAGNETIC TRAPPING OF NEUTRAL ATOMS. William D. Phillips, John V. Prodan y Harold J. Metcalf en *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 2, n.° 11, págs. 1751-1767; noviembre, 1985.

LASER EXTREMES PROBE ATOMS AND MOLECULES. Arthur L. Robinson en *Science*, vol. 230, n.° 4727, pág. 797; 15 de noviembre de 1985.

SODIUM ATOMS STOPPED AND CONFINED. Arthur L. Robinson en *Science*, vol. 229, n.° 4708, págs. 39-41; 5 de julio de 1986.

EL NIÑO Y LA OSCILACION DEL SUR

"EL NIÑO". SU IMPACTO EN LA FAUNA MARINA. Dirigido por W. Arnzt, A. Landa y J. Tarazona. Volumen extraordinario del *Boletín del Instituto del Mar del Perú*. Callao, Perú, 1985.

EL NIÑO EN LAS ISLAS GALÁPAGOS: EL EVENTO DE 1982-1983. Dirigido por G. Robinson y E. M. del Pino. Publicación de la Fundación Charles Darwin para las Islas Galápagos. Quito, Ecuador, 1985.

TALLER NACIONAL FENÓMENO EL NIÑO 1982-83. Número Especial de *Investigación Pesquera (Chile)*, vol. 32. Instituto de Fomento Pesquero. Santiago, Chile, 1985.

OCEAN VARIABILITY IN RELATION TO LIVING RESOURCES DURING THE 1982-83 EL NIÑO. R. T. Barber y F. Chávez en *Nature*, vol. 319, n.° 6051, págs. 279-285; 23 de enero de 1986.

EL NIÑO. Colin S. Ramage en *Investigación y Ciencia*, n.° 119, págs. 40-48. Agosto, 1986.

COMPUTADORAS OPTICONEURONALES

THE COMPLEXITY OF INFORMATION EXTRACTION. Yaser Abu-Mostafa en *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-32, n.° 4, págs. 513-525; julio, 1986.

OPTICAL COMPUTING: A FIELD IN FLUX. Trudy E. Bell en *IEEE Spectrum*, vol. 23, n.° 8, págs. 34-57; agosto, 1986.

COMPLEXITY IN INFORMATION THEORY. Dirigido por Y. Abu-Mostafa. Springer-Verlag, 1987.

LA ROTURA DE LOS CONTINENTES

PERIDOTITE COMPOSITION FROM THE NORTH ATLANTIC: REGIONAL AND TECTONIC VARIATIONS AND IMPLICATIONS FOR PARTIAL MELTING. Peter J. Michael y Enrico Bonatti en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 73, n.° 1, págs. 91-104; abril, 1985.

PUNCTIFORM INITIATION OF SEAFLOOR SPREADING IN THE RED SEA DURING TRANSITION FROM A CONTINENTAL TO AN OCEANIC RIFT. E. Bonatti en *Nature*, vol. 316, n.° 6023, págs. 33-37; 4 de julio de 1985.

PERIDOTITES FROM THE ISLAND OF ZABARGAD (ST. JOHN), RED SEA: PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY. Enrico Bonatti, Giulio Ottonello y Paul R. Hamlyn en *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, n.° B1, págs. 599-631; 10 de enero de 1986.

TERMORREGULACION DE LAS MARIPOSAS NOCTURNAS DE INVIERNO

TEMPERATURE REGULATION OF THE SPHINX MOTH, *MANDUCA SEXTA*: II, REGULATION OF HEAT LOSS BY CONTROL OF BLOOD CIRCULATION. Bernd Heinrich en *The Journal of Experimental Biology*, vol. 54, n.° 1, págs. 153-166; febrero, 1971.

MORPHOMETRICS, CONDUCTANCE, THORACIC TEMPERATURE, AND FLIGHT ENERGETICS OF NOCTUID AND GEOMETRID MOTHS. Timothy M. Casey y Barbara A. Joos en *Physiological Zoology*, vol. 56, n.° 2, págs. 160-173; abril, 1983.

FLIGHT OF WINTER MOTHS NEAR 0 °C. Bernd Heinrich y Thomas P. Mommsen en *Science*, vol. 228, n.° 4696, págs. 177-179; 12 de abril de 1985.

THERMOREGULATION BY WINTER-FLYING ENDOTHERMIC MOTHS. Bernd Heinrich en *The Journal of Experimental Biology*. En prensa.

UN CAMPO MESOLITICO EN DINAMARCA

THE EARLY POSTGLACIAL SETTLEMENT OF NORTHERN EUROPE: AN ECOLOGICAL PERSPECTIVE. Dirigido por Paul Mellars. Duckworth, Ltd., 1978.

MESOLITHIC PRELUDE: THE PALEOLITHIC-NEOLITHIC TRANSITION IN OLD WORLD PREHISTORY. Grahame Clark. Edinburgh University Press, 1980.

THE EUROPEAN MESOLITHIC. T. Douglas Price en *American Antiquity*, vol. 48, n.° 4, págs. 761-778; octubre, 1983.

JUEGOS MATEMATICOS

LA CAPTURA DEL MONSTRUO MATEMATICO. Martin Gardner en *Investigación y Ciencia*, n.° 47, págs. 108-113; agosto, 1980.

TALLER Y LABORATORIO

BASIC PHYSICS OF THE SOLAR SYSTEM. V. M. Blanco y S. W. McCuskey. Addison-Wesley Publish. 1961.

TALLER Y LABORATORIO. Jearl Walker en *Investigación y Ciencia*, n.° 34, págs. 120-126; julio, 1979.